

## | 第7章 |

### 地下水と気候変動： もはや隠れた資源ではない





## 第7章 地下水と気候変動:もはや隠れた資源ではない

### 1. はじめに

地下水は、地球上の数十億の人々、特にアジアの途上国の人々にとって、生活や食糧の安全保障を支える重要な資源である。各国における地下水の取水及び利用の傾向は必ずしも明らかになっていないが、世界全体で見ると、現在、飲料水の約 50%、水を自給している産業に必要な水の 40%、さらに灌漑用水の 20%が地下水を水源していると推計されている。また、アジア太平洋地域では、人口の約 32%が地下水を飲料水源として利用している(Morris et al. 2003)。

地下水は、この地域の経済発展に大きく貢献している。インド、バングラデシュ、ネパール、中国華北平原などでは灌漑だけではなく、工業生産にも利用されている。しかし、地下水が社会に与える価値は、取水量の観点のみで評価されるべきではない。地下水は、表流水に比べて、利用量あたりの経済便益が大きい場合が多い。これは地下水が地方レベルで入手可能で、干ばつ時にも利用可能であること、最小限の処理で利用できる良質の水であることに拠る(UN/WWAP 2003)。途上国では、今後、地下水の利用がさらに拡大するものと見られている。アジアでは、人口増加、農業活動及び人口 1 人当たりの水需要の増加に加え、都市化の加速、産業活動やエネルギー需要の増大などの要因によって、今後 25 年間にわたり、地下水資源への依存がさらに高まることが予測される(Gunatilaka 2005)。

地下水はアジアの持続可能な開発において重要な役割を担っているものの、これまで必ずしも適切に管理されてきたわけではなく、その枯渇や水質の悪化に至っている場合も多い。今後、積極的なガバナンスが行われなければ、未熟な地下水管理による悪影響によって、これまでに社会が得たものが無に帰する(もしくはマイナスになる)恐れがある(Mukharji and Shar 2005)。こうした問題に加え、現在、地下水管理は、地下水とその利用に負の影響を及ぼすであろう気候変動に対し、いかに適応すべきかという全く新しい課題に直面している。

気候変動による影響により、地下水資源に対する既存の負荷が増大する恐れがあるが、その理由として、(i)一部の地域では地下水の涵養能力が低下すること、(ii)降水量の変動が大きくなるため、利用可能な表流量に格差が生じ、その解消のために地下水が必要とされること、などが指摘されている。また、海面の上昇に伴い、海拔の低い沿岸地域では地下水の塩水化が予想される。気候変動による地下水への影響により、元来淡水資源に乏しく、地下水が利用可能な唯一の淡水源であるような地域では、近い将来、地下水さえも利用不可能、または利用に適さない状態になる恐れがある(IPCC 2007)。

地下水は、持続可能な開発のために重要な資源であると同時に、現在そして将来の世代にとっての予備的な淡水資源である。このような地下水の利点を維持するためには、これまで以上に戦略的かつ積極的に地下水を管理し、気候変動によって起こるであろう影響に対処する必要がある。しかし、表流水に比べ、地下水についての気候変動による影響評価への関心は低く(Kundzewicz et al. 2007)、多くのアジアの国は、気候変動が自国の水資源管理計画に及ぼす影響にまだ対応していない状況である。

本章では、地下水が現在抱えている問題を概観するとともに、気候変動がアジアの地下水資源に及ぼす潜在的影響及び負の影響を検討する。さらに、気候変動の潜在的影響への適応の可能

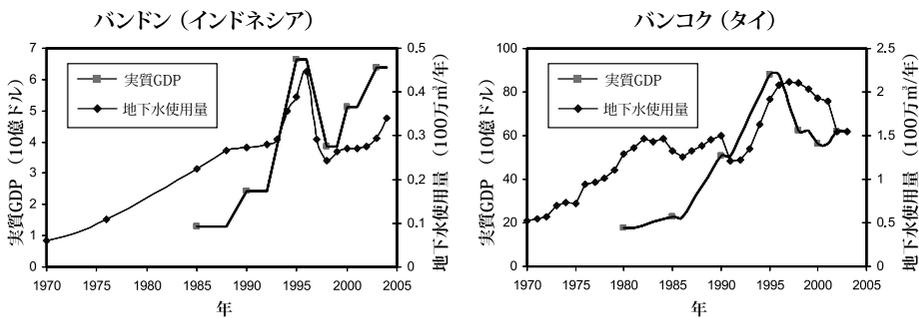
性についても探求する。気候変動の影響がもたらすリスクは、水資源管理のみならず、持続可能な開発において水が果たすさまざまな役割においても、極めて重大な問題である。

## 2. 地下水需要と社会・経済開発

### 2.1. 地下水の利用

アジアに暮らす約 20 億の人々が、飲料水を地下水に依存している。バングラデシュ、中国、インド、インドネシア、ネパール、フィリピン、タイ、ベトナムでは、飲料水の 50%以上が地下水と推計されている (UNEP 2002)。ジャカルタ、ハノイ、北京などの大都市では、地下水が主要な水源の一つである。多くの小規模都市や地方でも、地下水への依存が見られる。例えばカンボジアでは、農村人口の 60%が地下水に依存し (ADB 2007b)、バングラデシュでは、水道を利用できない人口の 76%が掘り抜き井戸を利用している (ADB 2007c)。都市部では、地下水は家庭用よりも工業に多く利用される傾向にある。工業利用される地下水が取水量全体に占める割合は、バンドンでは 80%、バンコクでは 60%である。これらの都市では、地下水の利用量と GDP に強い相関関係が認められる (図 7.1)。

図 7.1. 地下水取水量と市レベル GDP の相関関係

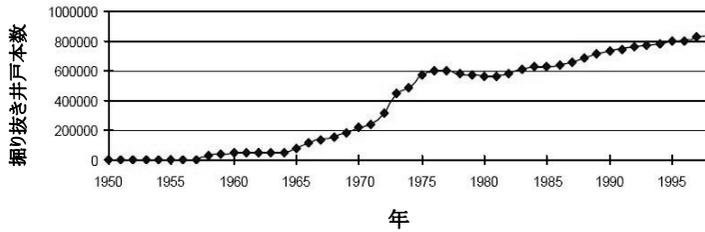


出典: Kataoka et al. 2006

インド、スリランカ北部、パキスタン・パンジャブ州、中国華北平原では、地下水が活発な農業を支えている。インドでは、農業用水全体の約 60%を地下水が占め、全灌漑面積の 50%以上で利用されている。同様に中国でも、農業用水全体に占める地下水の比率は、山東省で 50%、河南省で 50%、北京市で 65%、河北省で 70%となっている (中国水資源省 2000)。パキスタンのパンジャブ州は、国内の食料の大部分を生産する地域であるが、ここでの耕作に使われる水の 40%以上が地下水である (Qureshi and Barrett-Lennard 1998)。中国河北省及びパキスタン・パンジャブ州における掘り抜き井戸の設置状況 (図 7.2 及び 7.3 参照) は、農業分野における地下水への依存度が高まる傾向にあることを明確に示している。

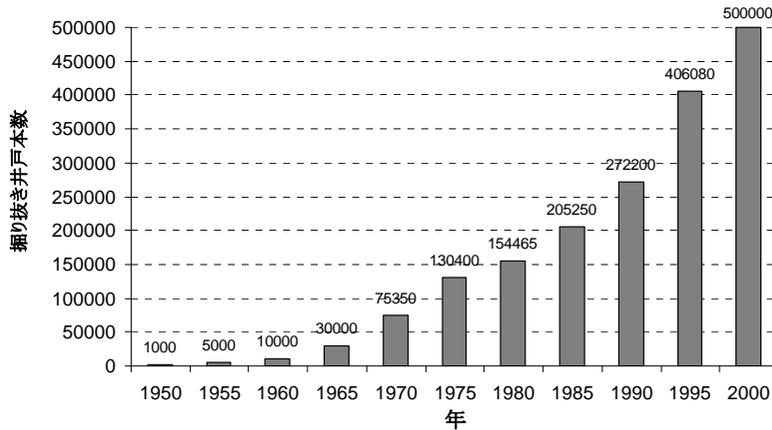
さらに、地下水による灌漑では、表流水の場合と比べ、定期的かつ必要な時に水が得られるため、生産性が高いことが明らかになっており、インドでは、地下水による灌漑を行う農地の生産高が、表流水灌漑の場合の 1.2 倍から 3 倍になると推計されている。パキスタン・パンジャブ州では、個人所有の掘り抜き井戸に対して約 250 億パキスタンルピー (Rs.) (2001 年時点で 4 億 US ドル相当) が投資され、年間約 1,500 億 Rs. (23 億 US ドル) の利益をもたらしている。この投資の対象者は、個人で掘り抜き井戸を所有する、または近隣の掘り抜き井戸から水を購入している 250 万人以上の農民である (Dhawan 1989)。

図 7.2. 掘り抜き井戸設置状況 (中国河北省)



出典: Shah et al. 2001

図 7.3. 個人所有の掘り抜き井戸の増加状況 (パキスタン・パンジャブ州)



出典: Shah et al. 2001

## 2.2. 地下水に関連する問題

地下水は入手が容易で安価な水資源であるため、自然の涵養能力を超えた量が取水され、その結果、その枯渇や水質悪化に陥る場合が多い。アジアの一部の都市では、地下水の過度の汲み上げにより、以下のような深刻な問題が発生している。

- 地盤沈下
- 地下水位の低下
- 地下水質の汚染(ヒ素、フッ化物、アンモニア)
- 塩水化

中国では、モニタリングが実施された 194 の主な都市と地域の 30%で地下水位が低下している (WEPA 2007)。バンコクなどの都市では、地下水の過剰汲み上げにより、地下水位が大幅に低下し、地盤沈下が生じている(図 7.4) (IGES 2007)。1980年、1990年及び2003年にアジアの一部の都市における地下水位の低下と地盤沈下累積量から、これらすべての都市で地下水位の低下が続いていることが確認された(表 7.1)。

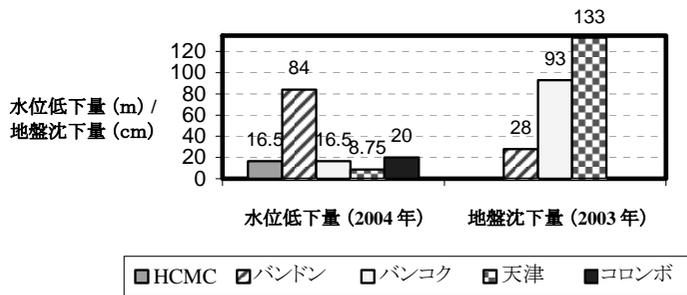
表 7.1. 地下水の過剰汲み上げによる影響 (アジア各都市)

調査都市	平均水位低下量 (m/年)			平均地盤沈下量 (mm/年)		
	1980	1990	2003	1980	1990	2003
調査年	1980	1990	2003	1980	1990	2003
バンコク	1.0	3.0	-1.5	23	25	15
バンドン	1.3	6.5	0.8	-	10	18
コロombo	-	-	1.0	-	-	-
HCMC	0.1	0.95	1.0	-	-	-
キャンディ	-	-	2.5	-	-	-
天津	-	-	0.63	119	15	31

出典: IGES 2007

2003 年には、年平均地盤沈下量は、バンコクで 15 mm、バンドンで 18 mm、天津では 31 mm であった。地盤沈下は、建物のほか上下水道網などのインフラにも影響を及ぼすだけでなく、バンコクで見られるような地下水の塩水化を引き起こす恐れもある。

図 7.4. 地下水位の累積低下量及び累積地盤沈下量 (アジアの都市)



出典: IGES 2007

地下水の水質汚染は、数百万人の健康に影響を及ぼしている。インド、バングラデシュ、その他の地域の河川デルタでは、ヒ素による汚染が多数報告されているが、十分な対策が取られているとは言えない。インド、中国、タイの一部の地域では、フッ素による汚染のために安全な水の供給が制約されている。タイ北部のランプーン県で行われた飲料水のフッ化物濃度に関する調査では、国が定める基準値が 0.7 mg/L であるのに対し、最大 15.0 mg/L を記録した。さらに、米をとぐ際にフッ素濃度の高い水を使うことが、調査地域におけるフッ素の主な摂取源となる可能性があることが明らかになった (Takeda et al. 2007)。

天津も地下水におけるフッ素濃度が高い都市であるが、地元住民の歯のフッ素症の比率が全国調査の結果よりもはるかに高いことが報告されており、全国の都市部の平均が 5.21% であるのに対し、天津都市部では 41% に達している (Xu et al. 2008)。自然由来の汚染に加え、地下水には、不適切な衛生システム、管理が不十分な埋立地からの滲出水、汚染された表流水などによる汚染のリスクに曝されている。地下水の汚染が地域住民の健康に関係しているのは間違いないが、モニタリング体制の不備や地下水質に関する認識不足から、汚染状況に関する調査が適切に実施されていない。

## 2.3. アジアにおける地下水管理の現状

### 2.3.1. 地下水に関する法令

アジアにおける水資源管理の進展は、水関連の法律の整備や改正の形で現れている(ADB 2007a)。水資源に関する基本法では、地下水の取水の免許付与や許可制を導入し、それを管理改善の基本とするものが多くみられる。このような法律には、中国の水法(2002年)、ラオスの水資源法(1996年)、フィリピンの水法(1976年)などがある。しかしこれらの法律が定めているのは、管理の枠組みにとどまり、実施が不十分であっても制裁が課されないため、実効性は低い。さらに、地下水の利用に関しては、適切な法の整備が進んでいない国も多い。

一般的に、地下水の過度な利用による負の影響が明らかになっている国では、利用に関する規制が整備されている。日本やタイでは、地下水の利用を制限し、地盤沈下など地下水の汲み上げに起因する問題の改善に努めることを目的として、国が具体的な法律を整備している。しかし、これらの法律に基づいて地下水の利用を実際に制限しているのは、地盤沈下が深刻な地域に限られている。地方レベルでも、国の法律の有無に関わらず、それぞれの状況に応じて地下水の取水を制限する規則が設けられている(表 7.2)。一般に、地方レベルの規則の方が、当該地域における地下水及びその利用状況を反映しているため、実効性が高い。

表 7.2. 地下水の取水及び利用制限に関する地方レベルの規則

地名(国名)	規則名	背景/目的
天津 (中国) <sup>1)</sup>	天津における地下水管理のための暫定策(1987年)	地下水の取水を規制し、地盤沈下を招く地下水位の低下を緩和する。
マハラシャトラ (インド) <sup>2)</sup>	マハラシャトラ地下水法(1993年)	飲料水資源保全のため、地下水利用を規制・制限する。
ケララ (インド) <sup>3)</sup>	ケララ地下水法(2002年)	地下水を保全し、州内における地下水の取水と利用を規制・制限する。
バンドン (インドネシア) <sup>1)</sup>	西ジャワ州規則 16/2001(2001年)	地下水利用を規制し、資源の枯渇を防ぐ。
熊本(日本) <sup>4)</sup>	熊本県地下水保全条例(1992年)	地元住民の共有資源である地下水の量と質を保全する。

出典: <sup>1)</sup> IGES 2007、<sup>2)</sup> Phansalkar and Kher 2006、<sup>3)</sup> Environmental Law Alliance Worldwide ウェブサイト (<http://www.elaw.org/resources/text.asp?id=2846>)、<sup>4)</sup> 熊本県ウェブサイト ([http://www.pref.kumamoto.jp/eco/project/kankyokankyou11\\_01.htm](http://www.pref.kumamoto.jp/eco/project/kankyokankyou11_01.htm))

### 2.3.2. 公的機関の組織構成

地下水の管理については、複数の公的機関または省庁が国レベルの管理を管轄し、地方自治体がその実施にあたるケースが多い。しかし、国レベルの各機関間及び国と地方の行政機関の間の調整は、地下水の利用制限策を実施する上で必ずしも十分ではない。ホーチミン市の場合、4つの省(天然資源環境、工業、農業農村開発、運輸公共事業)が地下水管理に関係する業務を担当しているが、調整が不十分であることが業務の効果的实施やデータ蓄積の障害となっている(IGES 2007)。

さらに、地下水は表流水とは別の公共機関・部署が管理している場合が多い。インドネシアでは、表流水の管理を管轄するのは公共事業省であり、一方、地下水の管理はエネルギー・鉱物資源省が担っている。タイでは、天然資源環境省内の2つの部局が表流水と地下水をそれぞれ管理している。また、これらの国では、農業に利用される地下水については、農業関係の省庁もある程度の責務を担っている。中国とフィリピンでは、国レベルでは単独の省庁または国の水関係の政策を決定する機関が、表流水と地下水の管理に主たる責任を有している。しかし実施レベルでは、こうし

た責任が灌漑、水供給、工業などの各セクターの担当部局に委譲される傾向がある。十分な調整が行われない状況下において、部門別のアプローチが進められることが、水資源の効率的利用及び管理の妨げとなっている。

### 2.3.3. 料金徴収制度

地下水は長年にわたって無料で利用されてきたが、地下水の取水に対して、利用者負担または税金の形で料金を徴収する制度が一部で導入されており、その大半が地下水取水の抑制を目的としている。地下水料金又は税は、バンコク、バンドン、天津、さらに最近ではホーチミン市でも導入されているが、料金徴収による地下水需要を抑制する効果には限界がある。例えば、バンドンと天津では、上水道が地下水の代替用水となることが期待されているが、地下水利用料は上水道料金よりも安価に設定されているため、代替が進まない。天津では、地下水を最も多く使っている農業に対する地下水料金の徴収が免除されているため、料金制度は地下水需要の減少には効果を発揮していない(IGES 2007)。

### 2.3.4. 地下水の代替水源

地下水の汲み上げを効果的に抑制するためには、地下水に代わる他の水資源の確保が必須である。天津では、他の流域から転用させた水を供給することによって、都市部における地下水の利用が減少している(ただし、他流域からの転用については新たな問題が生じる可能性がある)。大阪では、1960年代に表流水を工業利用目的に利用することで、地下水の過剰揚水の問題を改善している。バンドンにおける地下水の汲み上げは、免許付与や料金制度を導入しても抑制できなかったが、その理由の一つに、バンドンにおける最大の利用者である工業部門の需要を満たすために十分な表流水が確保されていないことが挙げられる。一般に、利用可能な淡水量には限りがあるため、地下水の管理に関しては、地下水に代わる別の水源の開発よりも、むしろ水利用の需要抑制に取り組むべきである。

## 3. 気候変動が地下水資源に及ぼす潜在的影響

気候変動が水資源全般に及ぼす影響については、かなり前から認識されているが、地下水に関する研究はあまり行われていない(IPCC 2001)。地下水に関連する気候変動の研究では、降水と気温パターンの変動により生じると見られる直接的な影響を定量化することに、主眼が置かれてきた(Yusoff et al. 2002;Loaiciga et al. 2000;Arnell 1998)。こうした研究では、土壌-水バランスモデル(soil water balance model)(Kruger et al. 2001; Arnell 1998)、実証モデル(Chen et al. 2002)、概念モデル(Cooper et al. 1995)、さらに複雑な分布型モデル(Croley and Luukonen 2003; Kirshen 2002; Yusoff et al. 2002)など、さまざまなモデル化の技術が利用されているが、これらのすべてが、降水と気温以外のパラメータが一定であると仮定した上で、地下水の涵養に及ぼす変化を導き出している。

### Box 7.1. 気候変動が地下水資源に及ぼす潜在的影響の事例

#### 直接的影響

- 降水及び蒸発散の期間、量、程度の変動によって涵養率が増減。
- 海抜の低い河口デルタでは、海面上昇により塩水が内陸及び河川の上流に侵入。
- 酸化炭素濃度の変動が、二酸化炭素の溶解及びカルスト形成に影響。

#### 間接的影響

- 土地被覆(自然の植生・作物)の変化によって涵養率が増減。
- 洪水や干ばつの増加により表流水への依存度が低下し、地下水の取水が増加。
- 洪水の頻発化が、沖積地の帯水層の地下水質に影響。
- 土壌の有機炭素の含有量の変化が、帯水層上の浸透特性に影響。

### 3.1. 気温及び降水の変動による潜在的影響

気温と降水の時間的・空間的な変化は、帯水層における表層部分の水力学的な境界条件を変え、最終的には、水収支に大きな変化をもたらす。例えば、降水量、降水時期及び降水パターンの変化はすべて、帯水層への涵養量と涵養時期を判断する上で重要な要素である。2080年から2100年までの間の大気・海面グローバル循環モデルに連結させたMRI-CGCM2.3.2の結果では、中央アジアにおいて気温が3.5～4.5℃上昇し、降水量が減少することが示されている。南アジアでは、気温が2.5～3.5℃上昇し、降水量は増加すると予測されている。降水量の変動については、中央アジアでは約1mm/日の減少、南アジアではほぼ同量の増加が予測されている。降水量の変化により、表流水の量はさらに不確実性が高まり、台湾で行われているような、「確実性の高い」地下水資源の開発への転換が促進されるものと見られている。(Hiscock and Tanaka 2006)

また、干ばつや強雨の頻度の変化が、帯水層の水位に影響することも予測されている。干ばつにより水位は低下するが、これは降水量の減少に加え、蒸発量が増加し、さらに表土の乾燥の進行に伴い浸透量が減少することが原因である。逆説的ではあるが、高地では豪雨化が地下水の涵養量の減少につながる場合がある。これは降雨の大部分が吸収されずに流出してしまうためである。同様に、強雨の頻発によって洪水の程度及び頻度が高まり、氾濫原の中には地下水の涵養量が増加するところも現れる。

### 3.2. 海面上昇による地下水質の劣化

地球の気温が上昇するに従って、氷床や氷河の溶解による海水面の上昇が予測される。海水面の上昇により、低地の河川デルタでは、内陸や河川上流への塩水の浸入が引き起こされる(IPCC 1998)。塩分濃度の上昇は、表流水や地下水の供給を妨げ、都市部における水供給、生態系、沿岸域の農地に被害をもたらす(IPCC 1998)。さらに、降水量の減少による地下水位の低下が、海面上昇による影響をさらに増大させる。沖積地における帯水層の塩水化は、深刻ではない場合もあるが、石灰岩の帯水層では濃度が高くなる。地下水の涵養率、流量、流出量が低下し、帯水層の温度が上昇することによって、細菌、農薬、栄養塩、金属による汚染度が高まる可能性がある。同様に、洪水の増加によって、都市廃棄物及び農業廃棄物が地下水系、特に不圧帯水層に流入した場合には、地下水質がさらに悪化する。

世界の人口の約45%は海拔の低い沿岸地域に住み、その約3分の2がアジアの住民である(IHDP 2007)。海面上昇は、すでに多くの人々の生活に影響しており、その結果、莫大な資本価値、土地、貴重な湿地が失われ、多額の適応及び保護のためのコストが発生している(表7.2)。アジアだけでも、予測される海面上昇によってベトナム、バングラデシュ、インド、中国などの南アジア、東南アジア、東アジアに住む数百万の人々の住居が洪水の被害を受けると見られている(Wassmann et al. 2004; Stern 2006; Cruz et al. 2007)。

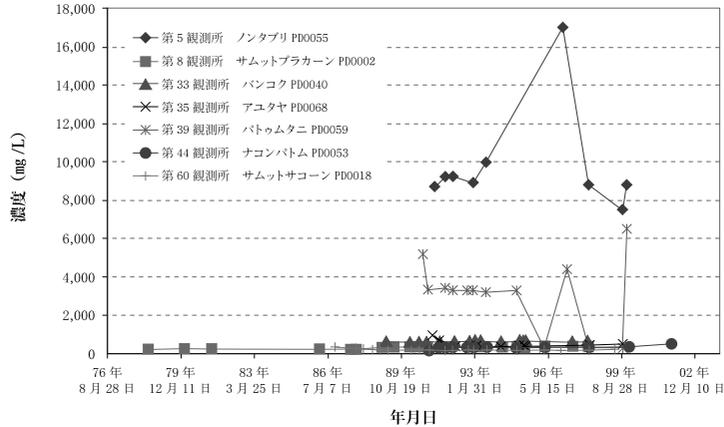
表7.3. アジア太平洋地域における海面上昇の影響

国名	被災者数		資本価値損失額		土地の損失		湿地の損失	適応/保護コスト	
	人数 (1,000人)	合計%	100万US ドル	% GNP	km <sup>2</sup>	合計%	km <sup>2</sup>	100万US ドル	% GNP
バングラデシュ	71,000	60	-	-	25,000	17.5	5,800	>1,000	>0.06
中国	72,000	7	-	-	35,000	-	-	-	-
日本	15,400	15	849,000	72	2,300	2.4	-	>156,000	>0.12
キリバス	9	100	2	8	4	12.5	-	3	0.10
マーシャル諸島	20	100	160	324	9	80	-	>360	>7.04

注: 既存の開発のトレンド及び1mの海面上昇を想定。人口密度の低い地域を除き、すべての影響に関しては、適応策が実施されなかった場合、適応コストについては何らかの保護策が実施された場合を想定。金額は1990年のUSドルで換算。出典:OECD 2003

帯水層の塩水化は、沿岸地域に位置するアジアの多くの都市部で確認されている。バンコクの複数の観測地点で、塩素濃度が許容限度である 250 mg/L を超えている (IGES 2007)。その一例が、図 7.5 に示すバンコクのプラ・プラデーデン帯水層における塩素濃度の季節変動である。沿岸に近接する第 8 観測所(サムットプラカーン PD0002)及び第 60 観測所(サムット・サコーン NL0032)では、海面上昇に伴い塩分濃度が高まるものと見られる。

図 7.5. プラ・プラデーデン帯水層 (バンコク) における塩素濃度の推移



出典: Babel et al. 2006

ホーチミン市では、塩水化が一部の地区で確認されているが、増大する水需要を満たすために地下水が過剰に取水された結果、地下水位の低下が続いており、塩水化現象は拡大傾向にあると見られる (IGES 2007)。マニラでは、満潮時に海水がパッシング川に入りこむため、パッシング市及び周辺地域における地下水の塩分濃度が高くなっている (フィリピン国家水資源評議会 2004)。帯水層と海底とが水理的に境界を接しているこれらの沿岸域の一部では、気候変動による海面上昇によって、淡水の帯水層への海水流入が増大する可能性がある。

### 3.3. 気候変動から生じる土地利用変化がもたらす潜在的影響

気候変動に関する研究によれば、アジア太平洋地域の一部では、気候変動と大気中の CO<sub>2</sub> 濃度の上昇が、最初のうちは森林及び植生に有益な効果を与えるとされている。植生変化のシナリオは、地下水の涵養に直接また間接的に影響を及ぼす。例えば、チベット高原では、大草原地帯と砂漠地帯の生物群系が減少し、針葉樹、広葉樹、常緑広葉樹の森や低木林が広がることが予測されている。森林の拡大によってチベット高原の地下水の涵養が増加し、下流における河川の流れが変わる可能性がある。さらに、ある研究では、中国で気温が 2~4°C 上昇すると、樹種の分布に大幅な変化が生じ、森林群落が中国東部の非森林地帯へ移動するなどの事態も起こりえると示唆しており (CSIRO 2006)、このような森林地域の拡大によって、中国東部の地下水の涵養が増加すると見られている。

また、大気中の CO<sub>2</sub> 濃度の上昇から生じる降水と気温の変化が、地中の不飽和帯を通過する水の浸透率を上昇させる可能性がある。CO<sub>2</sub> 濃度の上昇による植物、地下水及び不飽和帯への影響のシミュレーション・モデルをオーストラリアの亜熱帯及び地中海性気候の地域に適用したところ、亜熱帯地域では、降水頻度及び降水量の変化による影響が大きく、地中海性気候地域では、気温変化の影響をより強く受けることが明らかになった。いずれの地域でも、地下水の涵養率には非常に大きなばらつきがあり、地中海性気候の地域では、75~500% 上昇し、亜熱帯地域では、34% 低下したところから 119% 上昇したところまでであった (Green et al. 2007)。

アジア太平洋地域では、森林や農地(植物)に代わり、都市市街地(コンクリートとアスファルト)が急速に拡大している。バンドン、バンコク、上海、コロンボ、キャンディなどの場合、こうした変化の対象となった農地は主に水田である。さらに、コロンボとキャンディの都市周辺部では、1970年代末には、二期作によって収穫率が200%に近かったが、この10年で平均140%にまで低下した。このため水田の湛水量が減少し、さらに地中流量と地下水涵養量が低下して、都市部一帯の水資源に影響を及ぼしている(IGES 2007)。他の都市周辺部でも、地下への浸水量の減少により、都市部の工業及び住民が利用する帯水層への地下水の涵養が減少するものと予測される。

### 3.4. 植林及び炭素隔離による地下水の潜在的劣化

森林は、気候変動を緩和する重要な役割を果たしている。IPCCは、持続可能な森林管理によって、森林減少・劣化に由来する温室効果ガス排出削減(REDD)、植林、既存の森林における炭素吸収・固定の増加、バイオ燃料用のバイオマスの供給、さらに炭素削減対策としてコンクリート、アルミニウム、鉄、プラスチックなどのエネルギー集約度の高い製品に代わる木材の供給などが可能となると認識している。炭素吸収源及び貯蔵場所である森林を正しく評価し、森林保全に対するインセンティブを付与することについては、国際的な関心が高まっている(本書第4章参照)。しかし、森林面積の増加によって蒸散量が増加すると、地下水の涵養に影響が生じるものと見られることから、具体的なプロジェクトを進める前には現地調査の必要がある。一部の研究では、一般に、非森林地域よりも森林における地下水の涵養が少ないことが明らかにされている(Scanlon et al. 2006)。

帯水層における炭素隔離は地下水の汚染を引き起こし、予測不能な影響を人の健康に及ぼす可能性がある(Jackson et al. 2005)。二酸化炭素が地下水に入り込むと地下水の酸性度が高まり、鉛などの有毒物質が岩石から水に溶出するため、地下水が利用できない状態になる恐れがある。こうしたリスクへの対応・管理には、土壌や地質に加え、地下水の酸性度を上昇させない最適な隔離量についてのさらなる研究が必要となる。

### 3.5. 水利用の変化に伴う地下水依存度の増大

今後、気候変動の影響によって表流水の信頼性がさらに失われ、地下水への依存が増大する可能性がある。多くの地域において、気候変動によって干ばつと洪水の頻度が増すために表流水の量が不安定となるとともに、水質が劣化することが予測される(Kundzewicz et al. 2007)。IPCCのレポートでは、気候変動が水供給の信頼性に及ぼす悪影響を抑制するには、現行の水管理施策が不十分になる可能性が極めて高いと指摘している。

## 4. 適応策及び戦略

水の安定供給に対するリスクを最小限に抑えるため、水管理当局は過去の気象データを基にした気候の年間の変動特性を考慮して供給計画を策定している。しかし、気候変動によってその変動特性が極端化し、今後は過去のデータをそのまま使用することが困難になってくる恐れが高い。水資源管理当局は、気候の変動特性及び将来の水供給計画にこれまで以上のリスクを見込んだモデルを策定し、地下水の管理についてもその中に盛り込む必要がある。

気候変動が地下水に及ぼす影響を最小化する万能薬は存在しない。第一段階として、適応策を水管理計画に組み入れ、既存の管理システムや対策の強化を図り、顕在的・潜在的な影響に対処することが必要である。地下水の保全、地下水の生態系の維持、水の地下貯蔵という観点から、帯水層における地下水量を増加させる必要がある。第二段階では、水源を分散し、特に干ばつ時の水不足のリスクを抑えるため、水の保全を推進する。そして第三段階では、適応策を推進するた

めの制度面の整備が必要であり、地下水管理におけるパラダイム・シフトが必要となることも想定される。実現可能な構造面や制度面の選択肢については、本セクションで検討する。

#### 4.1. 構造的適応

構造的適応には、帯水層の貯水能力や水流からの取水の強化を可能する、または水質の悪化を最小限に抑えるような物理的なインフラや技術を整備することなどがある。構造的適応策には、以下の例が挙げられる。

- 雨水利用
- 帯水層の人工涵養
- 淡水化プラント
- 地下ダム
- 貯水ダム及び砂防ダム

本章ではこれらの中から、簡便で低コスト、さらに途上国でも実現可能である雨水利用、帯水層の人工涵養及び貯水池の建設について述べる。

##### 4.1.1. 雨水利用及び保全技術の推進

雨水利用は、屋上や地上に設けた集水槽・池で雨水を集めて貯蔵し、家庭、農業、工業、環境などの目的に利用するという簡便で低コストの技術である。また、拡大する都市部にとって、将来の気候変動が現在想定されているシナリオのように進んだ場合、雨水利用には多くの利点がある。アジアの多くの都市では、すでに河川の水質が家庭用水やその他の水利用に適さない状態になっており、汚染が進んで水質が悪化した川を元の状態に復元させるために、多額の財政投資と大規模な制度改革が必要となっている。雨水利用は、あらゆる場所、時期における水の利用可能性を高めるだけでなく、結果的に地下水位を上昇させ、地下水の生態系を改善することができる。地下水を利用する際には地下から水を汲み上げる必要があるが、雨水タンクを高いところに設置すれば、エネルギーの節約にもなる。さらに、雨水利用により洪水や土壌侵食が減少する。このように、雨水利用は多大な社会・経済的便益を生み、貧困の削減や持続可能な開発にも貢献することができる。

雨水の集水・放水には、伝統的な技術と革新的な技術の両者を取り入れることができる。こうして利用される雨水が、干ばつの起こりやすい地域では地下水へのストレスを抑え、帯水層の汚染が問題となっている沿岸付近の海拔の低い地域において、新たな水源の役割を果たすことが可能である。流域面積の 1%から 5%を雨水利用に割り当てることにより、水が不足するコミュニティの需要を満たすことができる (Sharma and Smakhtin 2006)。しかし、さまざまな行政レベルと管轄区において雨水利用を推進するためには、政策的枠組みと制度上の仕組みを整備する必要がある。

**家庭利用に向けた雨水の集水** - アジアでは、家庭における雨水利用は一般的に行われている。屋上で集めた雨水の利用は、帯水層の塩水化のために地下水の涵養が有効ではない海拔の低い沿岸地域においても有益である。雨水は、家庭内での利用に加え、涵養技術を使って地下水の涵養に活用することもできる。沿岸地域では、雨水による帯水層の涵養によって塩分の濃度をある程度低下させ、予備の供給源として利用することができる。

#### Box 7.2. 屋上における雨水集水可能量

年平均降水量が 1,000 mm の場合、250 m<sup>2</sup> の区画における雨水集水可能量は、屋上面積をその 50% と仮定した時、12 万 5,000 リットル (=0.5×250×1×1000) となる。このうち貯蔵されるのが 60% のみとすると、利用可能な水の量は、年間 7 万 5,000 リットル (=0.6×125,000) であり、1 区画当たりで 1 日に利用可能な量は、250 リットル

ル(=75,000÷365)となる。5人家族の場合では、1日に1人が利用できる量がCO<sub>2</sub>、50リットル(=250÷5)である。1日に必要な水の平均量は約100リットルであることから、屋上の雨水で1日の必要量の半分を満たすことができる。

出典: WAC, UNHABITAT and DUADGMP 2007

インドの一部の州や都市では、新規の建築物に対する雨水利用が義務付けされており、専有面積、区画面積、階数、使用目的(民間、政府、商業、住居など)に応じて義務が課せられている。インドール州などでは財産税の減税のようなインセンティブが付与されているほか、タミルナドゥ州などでは、強制的に雨水利用設備を設置して所有者から費用を徴収するという厳しい方法を取っている。

表 7.4. 雨水利用に関する法令(インドの州及び都市)

州及び都市	管轄当局	設置義務	条件
ニューデリー	都市問題貧困削減省	義務	屋上面積が100 m <sup>2</sup> 超の新築建物、面積が1,000 m <sup>2</sup> 超の予定の新築建物
インドール	-	義務	面積が250 m <sup>2</sup> 超の新築建物、財産税を6%免除
ハイデラバード	-	義務	面積が300 m <sup>2</sup> 以上の新築建物
チェンナイ	-	義務	3階建ての新築建物(屋上面積に関わらず)
ラージャスターン	-	義務	都市部で500 m <sup>2</sup> の区画を持つ公共施設
ムンバイ	-	義務	1,000 m <sup>2</sup> 超の区画に建設されている建物
グジャラート	州道路建築局	義務	行政機関の建物

出典: WAC, UNHABITAT and DUADGMP 2007

雨水利用プロジェクトの普及には、水に関する政策と規制が大きく影響する。雨水利用政策の改善には、主要なステークホルダーが持つ関心事に対応し、雨水利用に関する教育や普及技術を提供し、国内各地の他の水源からの供給と併せて雨水の最も望ましい利用形態を判断するとともに、雨水を最大限利用することができるようにするために、インセンティブと規制の最適な組み合わせを実現することが必要である(Sundaravivel et al. 2006)。

### Box 7.3. フィリピンにおける持続可能な雨水利用プロジェクト

フィリピン・カピス州の雨水利用事業は、カナダの国際開発研究センター(IDRC)の支援を受けて1989年から実施されている革新的かつ持続可能なプロジェクトである。このプロジェクトは、(i)2~10 m<sup>3</sup>規模の雨水タンク500基の設置、(ii)家畜の飼育などの生計活動に対する融資という二つの要素で構成されていた。

村の住民には、3年の返済期間で200 USドルが融資された。住民は豚を1頭あたり約25 USドルで購入し、その後90 USドル程度の高値で売却した。豚を売った利益は、雨水タンクの費用及び融資の返済に充てられた。このプロジェクトでは、複数の便益、つまり水のアクセス、生活のための所得、農業生産用の肥料が得られた。

出典: UNEP-IETC 2002

雨水利用を可能にする要因は、対象地域における雨の量及び強度である。アジアでは、1年を通じての降水量が一定していないため、雨水は家庭利用における補助的水源にしかなり得ない。雨水利用システムの成功は、(i)利用可能な他の水源の量と質、(ii)世帯の規模及び1人当たりの水需要、さらに(iii)財政状況によって左右される。雨水利用システムは、掘り抜き井戸よりも費用対効果が高く、特に屋根の素材がこの方式に適している既存の建物に設置する場合には、その傾向が顕著である。タイ東北部では、雨水貯蔵タンク(かめ)は、1 USドル/Lであり、維持・管理費はごくわずかである(UNEP-IETC 2002)。しかし、波型のトタン屋根で集められた水を貯留して、飲料水として利用する際には、トタンの鉛や亜鉛が溶出して、飲料水に関する基準の許容濃度より高くなる可能性があるため、定期的に水質検査をするなどの注意が必要である。

**農業における雨水及び流出水の利用** – 農業は、アジアにおける地下水の最大の利用分野であるため、雨水や流出水を利用した農業を推進することにより、気候変動の影響から地下水に生じるストレスを最小化することができる。田畑の堤防(Field bunding)、輪状の堤防(contour bunding)、畝立て作業、保護溝(conservation furrows)、キーラインシステム(key line)及び棚田(contour cultivation)による作物栽培に基づく小規模貯水によって、灌漑作物用の耕作地の狭い一角に、雨水を集めることができる。ザクロ、ナツメヤシなどの乾燥地を好む園芸作物は、水が少ない地域でも十分に生育する(Sharma and Smakhtin 2006)。

*Khadin* はインドで最も広く行われている雨水利用及び水分保有システムである。*Khadin* は天然の集水地に囲まれた土壌の深い場所に設置するのが最適であるが、降水量が年間 150~350 mm しかない場所でも利用が可能である。高地からの流出水は、土で築いた堤防によって隣接する谷間に集められる。このシステムの下に栽培されるヒヨコマメの平均生産高は、市販の肥料を使わなくても 1 ha 当たり 2.5 ~ 3.0 t に達する(Sharma and Smakhtin 2006)。

同様に、小・中規模の集水池も雨水や流出水を取り込み、水不足を軽減させることができる。ネパールのダディン流域にある集水池はその成功例であり、灌漑や家畜に利用できる信頼性の高い水源となっている。近隣地域では 25 軒の農家が作物を栽培し、226 頭の家畜を飼育している。2,000 USドルを投じた集水池からは、乾期でも 105 m<sup>3</sup>の水が灌漑や家畜用に供給される。池は、地元のコミュニティによって適切に管理されている(Clemente et al. 2003)。

インド東部では、灌漑や魚の養殖に必要な水の貯蔵に、農地貯水(On-farm reservoirs: OFR)が利用されている(Pandey et al. 2005)。米-魚-マスタードを組み合わせた農業システムの実現可能性に関する研究では、面積がわずか 800 m<sup>2</sup>の農地の 17.5%を占める、法面の傾斜が 1:1 で深さが 2.4 m の OFR により、米の補助的灌漑、マスタードの種まき前の灌漑、魚の養殖用の水の需要を満たすことができることが明らかになった。経済分析によると、費用便益比は 1.87 であった。ヒマラヤ山脈北西部のソアン川の集水域では、トウモロコシや小麦の栽培用にさまざまな規模の集水構造が利用されており、それらの費用便益比は 0.41~1.33 となっている(Goel and Kumar 2005)。

アジアでは、家庭や農業における雨水や流出水の利用には潜在的可能性があるものの、ほとんどの国の政府は雨水利用システムを義務化していない。水資源及びその開発に関する政府の政策では、あらゆる水資源の開発・管理プロジェクトを計画・実施する一方で、コミュニティの参加を促す必要がある。集水及び保全に関する伝統的な方法についても、新たな技術を活用して改善することができる。家庭・農業用の雨水利用システムを、地元、地域、国レベルの水資源開発・管理計画に組み込むことが可能である(Sharma and Smakhtin 2006)。

**帯水層の涵養** – 世界各地で 80 万箇所以上のダムが建設されているが、これらが貯水しているのは、表面流出水のわずか 20%である。インドは、世界でも有数のダム建設国であるが、それでも年間約 1,150km<sup>3</sup>の雨水が、「涵養されない」形で海に流出している(INCID 1999)。このうちわずかな量でも地下に貯蔵されると、地下水の供給量を大幅に増加することができる。しかしそのためには、帯水層を適切に管理し、モンスーン季前の乾期に水位を計画的に下げしておく必要がある。部分的に水がなくなった帯水層では、モンスーンの雨と灌漑用水の再流入により涵養が行われる。多くの先進国では、既にこの種の帯水層管理を実施している。例えば地下水の人工涵養量が地下水利用量の全体に占める比率は、旧西ドイツで 30%、スイスで 25%、アメリカ合衆国で 22%、オランダで 22%、スウェーデンで 15%、英国で 12%となっている(Li 2001)。

アジアでは、帯水層の人工涵養に関する研究はほとんど行われていない。インドでは、中央地下水機構(CGWB)が、グジャラート、マハラシュトラ、タミルヌディ、ケララの各州の干ばつが発生しやすい地域で人工涵養に関する実現可能性調査を実施した。その結果、人工涵養システムの整

備・運営コストは妥当なものであるが、沖積地の帯水層及び感潮域における井戸の人工涵養に掛かるコストが非常に高額であることが明らかになった。さらに、人工的に涵養した水を灌漑に使う場合のコストは、他の水源を利用する場合と比べて高額になることが分かった。人工的に涵養した水の費用は、一作物当たり 15～50USドル/ha であった。これらの水を家庭で利用する場合のコストは妥当であり(年間 1 人当たり約 0.05～0.15USドル)、特に水不足の地域ではそのように判断された。人工涵養の初期投資及び運営コストは、給水車による飲料水の供給よりはるかに少額です。さらに、政府が帯水層涵養プログラムを救済事業として実施する場合には、(一般に労働報酬が除外される)コストはさらに低下する。

複数の技術の組み合わせによっても、コストを削減することができる。例えばマハラシュトラでは、浸透タンクシステムと、ハイブリッド結合井(hybrid connector well)タンクと呼ばれるシステムを比較すると、涵養量に大きな差がないにも関わらず、前者が約 12 万 US ドルなのに対し、後者はわずか 900 USドルであった (CGWB-UNESCO 2000) (表 7.5 及び 7.6 は、一部の人工涵養の方法及びそのシステムのコストを示す)。

表 7.5. インドにおける人工涵養の各方法の経済性

人工涵養構造のタイプ	各涵養構造の 1,000 m <sup>3</sup> あたりの資本コスト	年間 1000 m <sup>3</sup> あたりの運営コスト
注入井(沖積地域)	551 USドル	21 USドル
注入井(堅い岩盤)	2 USドル	5 USドル
水路の拡大(沖積地域)	8 USドル	20 USドル
涵養ピット(沖積地域)	515 USドル	2 USドル
涵養池又は浸透池(沖積地域)	1 USドル	1 USドル
浸透タンク(堅い岩盤地域)	5 USドル	1 USドル
Vasant Bandhava 又は砂防ダム	1 USドル	1 USドル
干満調整装置	56 USドル	15 USドル

出典: <http://www.unep.or.jp/ietc/Publications/TechPublications/TechPub-8e/recharge.asp>

表 7.6. 人工涵養システムのコスト

システム	量 (m <sup>3</sup> )	コスト (USドル)
セメントかめ	1	20
ファイブプロセメントタンク	70～80	756～1,513
石工地下タンク	21	202
	200	1,412
	300	4,538
涵養トレンチ	-	50～252
手動ポンプによる涵養	-	13～63
掘り井戸による涵養	-	126～252

出典: CGWB-UNESCO 2000

地下水の涵養には、雨水と流出水の他にも、処理排水を再利用することができる。処理排水による地下水の涵養は、すでに一部の国で実施されている。この方法は、自然を利用した追加的な処理ができること、また水の利用可能量の季節変動の緩和といった利点がある。しかし、途上国で導入する場合には、事前に慎重な評価を行う必要がある。処理排水を利用した地下水の涵養における最大の懸念は、処理水が細菌や化学物質で汚染されているリスクがあることである。

## 4.2. 制度面の適応及び配慮事項

### 4.2.1. 地下水管理から地下水ガバナンスへ

地下水に関連する重要課題や問題に対処するためには、管理からガバナンスへの移行が必須である。世界水パートナーシップ(2000)は、水ガバナンスを、水資源と社会のさまざまなレベルにおける水関連サービスの提供を開発・管理するための一連の政治、社会、経済、制度上のシステムと定義している。これには、水セクターに携わる部署の役割と責任に加え、地下水保全計画の策定、実施、施行を委任された部署を明確化する必要がある。この部署は、独立して業務の遂行ができなくなるような、いかなる利害の対立も防止しなければならない。また、一般的には、水資源開発の承認及び水質管理に携わっているが、水資源の開発には直接関与していない部署が望ましい。

地下水管理には水文学者と水管理者が関与するが、地下水ガバナンスでは、水文学者(及びその他の科学者)、政治家、そして最も重要な主体である水の利用者などを含めた広範なステークホルダーの意見が反映される。地下水ガバナンスには、国、市場そして問題を抱える地下水に生計を依存している個人も参加すべきである。重要なことは、政府の政策からガバナンスへの移行、つまり複数のレベル、複数のアクター、複数の側面、複数の手法、そして複数の資源を基礎とする統治形態へと移行することである(Mukharji and Shah 2006)。

**地下水の地方管理の推進** – 表流水と異なり、地下水の開発は、個人や小規模グループで実施されるため、水供給のための大規模な制度的枠組みを必要としない場合が多い(Bhandari and Shivakoti 2005)。従って、地下水管理は地方レベルで行うほうが有効である。また、地方分権型の共同管理が、地下水管理の新たな方法または補完的方法として紹介されることが多くなっている(Chebaane et al. 2004)。しかし、地下水の地方レベルでの管理を推進するためには、中央政府による指導や支援が必要である。

地下水の利用者がその資源を管理するに当たっては、地方レベルの自主規制を行う場合が多い(表 7.7)。地下水の地方レベル管理から得られた教訓は、(i)潜在的利用者にも規則の制定に参加させること、(ii)正式な地方組織がなくても可能であること、(iii)単純な規則でも機能すること、(iv)地方自治体からの支援があれば、地下水管理の範囲を他の分野に広げることが可能であること、(v)地方による地下水の利用規制は困難ではなく、費用も妥当で特別な注意を要する事項ではないことである。従って、地元による地下水管理の支援を推進することにより、中央政府にかかる負担が軽減され、地下水資源管理の持続可能性が確保できる。

表 7.7. 地下水の地方レベル管理事例

事例	国	規模 (ha)	管理のタイプ	方法
パンジダール	パキスタン	2,000 ~ 3,000	非公式の規範	掘り井戸の禁止
マスタング	パキスタン	2,000 ~ 3,000	非公式の規範、委員会	間隔に関する規則、ゾーン設定
ネロール	インド	1,500	非公式の規範、地方自治体	節水、涵養、深井戸の禁止
サウラシュートラ	インド	点在	非公式の規範、宗教リーダー	涵養、井戸に関する規制

出典: Steenbergen 2006

### 地下水利用権の配分

地下水の利用権の定義は、個人の利用者または利用者グループに対して、帯水層がある条件を満たしている、ある時点または一定の期間において汲み上げ割り当てを認めるというものである。地下水の利用権は、それぞれの状況に応じて慎重に設定、変更、適応されるべきである。地下水利用権を管理手段として機能させるためには、(i)初期割り当て量、(ii)登録の仕組み及び継続

的な登録システム、(iii)機能的なモニタリングシステム、(iv)個人または商業利用権によって設定された制限の強制、(v)信頼性の高い制裁システムを整備する必要がある(Kemper 2007)。地下水利用権を確立するためには、第一に、地下水が利用者の中で公共財とみなされることが必要である。

表 7.8. アジアの一部の国における地下水の所有権の定義

	定義	国
グループ 1	地下水は法律により共有財産と定義される。政府は水資源を管理・分配する権限を委任されている。	バングラデシュ、中国、ラオス、インドネシア、フィリピン、ベトナム
グループ 2	地下水の所有権に関する法令上の定義はないが、一般に、地下水は共有財産であり、中央政府がその資源の管理・分配に責任を有すると認識されている。	タイ
グループ 3	慣例上または慣習法上、地下水は土地所有者の個人資産と見なされている。	日本、インド、スリランカ

### 価格設定手法の導入

アジアでは、すでに地下水税や料金を導入している国も見られるが、セクション 2.3.3 で述べたとおり、多くの場合、これらは成功に至っていない。一般に、地下水の汲み上げは個人の土地で個人の機材を使って行われるため、独自の価格設定が必要である。地下水資源そのものの価格に加え、地下水の汲み上げに必要なポンプ、深井戸、エネルギーなどの投入に対する価格設定についても、この価格設定手法に含めることができる (Kemper 2007)。

**地下水資源の価格設定** – 利用者が、地下水の取水量に基づいて料金を支払う場合、地下水の使用量及びレベルを監視する効率的なツールが必要である。その一つがリモートセンシングであり、被覆作物を基にした地下水利用量の計測を可能にするものである (Kemper 2007)。

バンコクの地下水の課金システムは、成功事例と見なされている。バンコク首都圏のナコンパトムとサムットプラカーンの一部を除く地域では、1985年に地下水料金が導入されたが、地下水の揚水量の削減にはほとんど効果をもたらさなかった。これは当時の地下水料金が水道料金よりも安価であったことが一因であった。そこで、地下水の取水量を削減するため、地下水の料金は 2003 年まで徐々に引き上げられ、2004 年には「地下水保全料金」と名付けた新たな料金が追加された。その結果、現在、地下水の利用者は水道水よりも高い料金を支払っている。水道水供給の拡大と厳しい料金システムを組み合わせることによって、地下水の汲み上げは減少し、地盤沈下はいくぶん緩和されている。地下水保全料金は、地下水法に基づき、研究や地下水保全活動に充当されていることが画期的な点であるといえる。

**エネルギーの価格設定** – エネルギー価格の設定は、多くの途上国及び無料制を適用している国(インドのタミルナドゥ、アンドラプラデシの両州など)においても政治課題となっている (Bhatia 2005)。エネルギー価格設定の仕組みは、地下水にも悪影響を及ぼし、地下水の正当な価格が維持されない恐れがある。解決のための選択肢の一つは、小規模農家に対する報酬の一括払いであり、農家はそこから電気料金の全額を支払うようにするか、または農家が揚水量を減らした場合には支払料金が減少し、その「差額」を他に充てることができる。この仕組みにより、ある程度までは、地下水の正当な価格が歪められることにはならない(世界銀行 2006)。

### 地下水保護ゾーンの明確化

各帯水層はそれぞれ涵養率が異なり、それぞれに応じた量の地下水取水を持続することができる。地下水の取水量が涵養率を上回った場合、水位の低下、地盤沈下、塩分濃度の上昇といった問題を引き起こすことになる。そこで、帯水層の安全揚水量に基づいて地下水の保護ゾーンを明

確にすることが、深井戸や掘り井戸の禁止、揚水限界の明確化、地下水の取水に対する料金徴収、その他のインセンティブの付与といった政策の実施を後押しする。地下水保護ゾーンは、地下水取水に対する脆弱性のレベルに応じて分類することが可能であり、これらのゾーンは、汚染要因となる活動、すなわち都市開発、固形廃棄物の処分、化学物質の廃棄、採鉱、採石などの活動から保護されるものとする。農業による分散型汚染を防ぐため、地下水保護策には、農薬使用の禁止や持ち込み規制及び適正農業規範の採択を含めるものとする。地下水保護ゾーンの決定後は、住民への情報キャンペーンや地下水利用グループの結成など、ゾーン方式を補完する取り組みを開始することが可能である。

#### 4.3. 適応戦略と政府の政策・計画立案の統合

適応策への取り組みは、貧困の削減、農業開発、水資源開発、災害防止といった政策の中に組み込んで進める必要がある。地下水資源を長期的に保護する観点からも、地下水関連の適応策を進める上での懸念事項を持続可能な開発の計画プロセスに組み込むことは、戦略上重要である。しかし多くの途上国ではこうした方法を取ることが困難であり、その理由としては、(i) 計画立案、モニタリング、評価のためのスタッフの能力不足、(ii) 適応策に関するデータの不備と不十分なセクター間の情報共有、(iii) 適応に対するステークホルダーの認識が十分でないこと、などが挙げられる(UNFCCC 2007)。

地下水は、途上国における経済発展にとって極めて重要な役割を果たしているため、地下水へのアクセスの禁止や制限は、開発を止めることに等しい。農業や工業が地下水に大きく依存していることから、これらの産業の振興政策には、気候変動が地下水資源に及ぼす影響を組み入れるよう努めなければならない。

セクション 4.1.1 で述べたとおり、家庭での利用や地下水涵養のための雨水集水技術などの構造的な適応策は、低コストでしかも各地方で実施が可能である。従って、適切なインセンティブを付与したこのような適応策を統合的水資源管理(IWRM)原則に位置づけ、国レベルの水管理計画に取り入れるべきである。

#### 4.4. 人材育成、教育、トレーニング、意識啓発

途上国が気候変動に適応していくためには、ステークホルダーの自立と参加、及びあらゆるレベル、特に大学と中核的な研究拠点における人材育成が不可欠である。家庭用・農業用、さらに地下水の涵養用に雨水と流出水を収集することについて知識と技能を高めるため、地元住民に対する教育やトレーニングを実施することが、現在そして将来予想される問題に対処するための構造的な適応策の強化につながる。中核研究拠点の設置・強化及び水文気象ネットワークの構築などの制度的な人材育成には、外部からの支援が必要である。あらゆるセクターのステークホルダーに対してトレーニングを実施することによって、適応活動を計画・実施するための専門性の高いツールが開発され、地方及び国レベルの行政機関による活動が推進される(UNFCCC 2007)。

一般に、多くの途上国政府機関は、地下水資源の重要性及び気候変動が地下水に及ぼす潜在的な影響について国民の理解を深めるために十分啓発しているとは言い難い。そのため、専門家グループも一般市民も、地下水資源の管理問題に対する関心が低い。従って、すべての水利用者及び政府関係者も含めたステークホルダーが地下水の重要性について教育を受け、地下水資源の持続可能な管理に努める必要がある。

#### 4.5. 適応資金の調達機会

適応計画やプロジェクトを成功裏に実施するためには、特に途上国では資金が必要である。地球環境ファシリテーター (GEF) は、UNFCCC の指導の下に GEF 信託基金、特別気候変動基金 (SCCF)、最後発開発途上国基金 (LDCF) を運営している。適応プロジェクトの資金調達には、このほかに (i) 京都議定書に基づく適応基金、(ii) 多国間環境協定 (MEA) からの資金、(iii) 二国間及び多国間の開発資金、などがある。

GEF が現在運営している基金の中で、適応プロジェクトに利用可能な資金は、2007年8月時点で2億7,500万USドルにとどまっている。適応基金は、クリーン開発メカニズムプロジェクトに対する2%の税金から、2008年～2012年の間 (UNFCCC 2008) に年間8,000万～3億USドルを受領できている。こうした資金は、沿岸地域や都市中心部における雨水利用などの構造的・制度的な適応策に充当すべきである。投資ニーズを見極め、地下水資源の気候変動に対する脆弱性を評価するための人材育成には資金が必要である。さらに、気候変動及び地下水資源の管理を管轄する機関の強化にも追加資金が必要である。

### 5. 知識格差及び今後の研究ニーズ

気候変動が地下水資源に及ぼす潜在的な直接的・間接的影響、その結果として途上国の地元、地域、国レベルの社会・経済に及ぶ影響については、これまでほとんど研究が行われていない。従って、特に、基礎データが存在しない場合は、適応策のためのデータ収集といった非常に基本的な段階から研究を開始しなければならない。このデータ収集は、気候変動が地下水資源に与える負の影響及び関連するリスクの低減に関する知識の格差を解消するためにも必要である。緊急の研究課題は次のとおりである。

- (i) 気候変動が地下水資源に及ぼす社会的・経済的影響は何か？
- (ii) 気候変動が地下水資源に地方レベルで及ぼす潜在的影響は何か？また、気候変動が地方及び地下水資源に及ぼす影響を予測するためには、地球規模の気候変動モデルをどのようにダウンスケールした研究が必要か？
- (iii) 気候変動シナリオの下では、地下水の取水量の重要な閾値はどの程度か？
- (iv) 気候変動シナリオの下では、地下水のモニタリングをどのように改善すべきか？
- (v) 現在の地下水管理の構造的及び制度的な能力によって、予測される気候変動による影響に対処することが可能か？
- (vi) 気候変動が地下水資源に与える影響に対処するために活用できる適応策には、どのようなものがあるか？そしてそれらの経済的実現可能性、社会的受容性、環境への影響は適切に評価されているか？
- (vii) 地下水への影響を調査し、気候変動が地下水に与える影響に適応するための構造的・制度的方策を打ち立てるために必要な、最新のデータ及び情報の共有に適したネットワークやプラットフォームは、どのようにして構築できるか？

### 6. 結論と提言

多くの地域、そしてアジアに住む数十億の人々にとって、地下水は生活や農業に欠くことのできない資源である。気候変動が地下水資源に悪影響を及ぼすことが予想され、地下水涵養率の変動・減少、沿岸付近の帯水層の塩水化、地下水貯蔵量の長期的な減少傾向などが指摘されている。しかし、全体的には、地下水は備蓄能力を持ち、気候変動の影響を比較的受けにくい水資源である。従って、地下水の重要性が高まり、気候変動が水資源及び持続可能な開発に及ぼす最

悪の影響を緩和できる可能性を持っている。しかし、地下水資源は、一度深刻な状態に陥ると、その回復には多大な資金と時間を必要とする。

アジアでは、人口増加や経済発展により地下水に対するストレスが増大しており、地下水管理上、すでに深刻な問題に直面している。気候変動に対して適切な適応戦略を取らなければ、地下水資源に対するストレスの増大とともに持続可能性が失われた危機的状况に至り、セクター間及び国家間の水をめぐる紛争が激化することが予測される。構造的適応策(雨水集水・保全技術の推進など)及び制度的適応戦略(地元による地下水管理など)を合わせた包括的な水管理計画を策定すべきである。

気候変動が地下水資源に及ぼす影響及びそれに対する適応方法は、水管理分野の新たな検討課題である。知識の格差を解消し、気候変動が地下水資源及び今後の地下水管理に与える影響に関する不確実性を低減させるためには、更なる研究が求められる。優先的に取り組むべきテーマは、地球規模の気候変動モデルのダウンスケール手法の研究と現行の地下水管理構造・制度の評価である。

これまでの研究から得られた主な成果は以下のとおりである。

- (i) アジアにおける既存の水管理制度、政策、水関係のインフラは、地下水が抱える現状の問題の対処には成果を上げていない。気候変動によって新たにもたらされる負の影響に立ち向かうためには、より一層の努力が必要となる。
- (ii) 地下水に対する現在のストレス及び気候変動による潜在的影響に対する方策には、地下水の貯水量の保全・増加、さらには水不足のリスクを最小化するための水源の分散化を含めるべきである。
- (iii) 地下水の涵養用及び家庭・農業用の雨水利用は、実現性が高い構造的適応策であるが、この方法の推進には新たな政策形成が必要である。
- (iv) 地下水ガバナンスの向上、地元による地下水管理の強化などを含む制度的適応策の推進が必要である。地元住民の意識を高めることによって、地下水管理政策の効果を高めることができる。
- (v) 適応基金のような革新的資金を、制度の整備、人材育成、一般市民に対する教育、地下水資源に対する気候変動の影響に関する研究に充当すべきである。
- (vi) 気候変動の地下水資源への潜在的影響に関する知識の格差を解消するためには、地域毎の詳細研究が必要である。こうした情報は、気候変動の影響の緩和のための政策の形成にも寄与するものである。

## 参考文献

- Asian Development Bank (ADB). 2007a. Recent advances in water resources development and management in developing countries in Asia, Asian Water Development Outlook 2007 Discussion Paper. Manila, Philippines, ADB.
- Asian Development Bank (ADB). 2007b. Asian Water Development Outlook 2007 Country Paper Cambodia. Manila, Philippines, ADB.
- Asian Development Bank (ADB). 2007c. Asian Water Development Outlook 2007 Country Paper Bangladesh. Manila, Philippines, ADB.
- Arnell, N. 1998. Climate change and water resources in Britain. *Climatic Change* 39(1): 83-110.
- Babel, M.S., A.D. Gupta, S.N.D. Domingo, A.G. Kamalamma. 2007. Sustainable groundwater management in Bangkok. *Sustainable Groundwater Management in Asian Cities*. Hayama: IGES, pp26 – 43.

- Bala, G., K. Caldeira, M. Wickett, T.J. Phillips, D.B. Lobell, C. Delire and A. Mirin. 2007. Combined climate and carbon-cycle effects of large-scale deforestation. *PNAS (physical sciences/ environmental sciences)*, 104(16): 6550–6555.
- Bhandari, H. and G.P. Shivakoti. 2005. Groundwater markets and irrigation potential in South Asia: A micro study from Nepal. In *Asian irrigation in transition*, edited by G.P. Shivakoti, D.L. Vermillion, W. Lam, E. Ostrom, U. Pradhan and R. Yoder, 127-153. Sage Publication, New Delhi, Thousand Oaks, London.
- Bhatia, R. 2005. Water and energy, Background Paper for the report India's water economy: bracing for a turbulent future. World Bank, 2006.
- Central Groundwater Board – United Nations Educational, Scientific and Cultural Organisation (CGWB-UNESCO). 2000. Rainwater harvesting and artificial recharge to groundwater: A guide to follow. Central Groundwater Board - International Hydrological Program (IHP), New Delhi, India.
- Chebaane, M., H. El-Naser, J. Fitch, A. Hijazi, A. Jabbarin. 2004. Participatory groundwater management in Jordan: Development and analysis of options. *Hydrogeology Journal*, 12(1):14-32.
- Chen, Z.H., S.E. Grasby, K.G. Osadetz. 2002. Predicting average annual groundwater levels from climatic variables: an empirical model. *J. Hydrol.* 260(1-4): 102-117.
- Clemete, R.S., I. Rashid and S.M. Wahid. 2003. Water harvesting and management in the cultivated uplands of Dhading watershed, Nepal. Proceedings of the first APHW conference, Kyoto, March 2003.
- Cruz, R.V., H. Harasawa, M. Lal, S. Wu, Y. Anokhin, B. Punsalmaa, Y. Honda, M. Jafari, C. Li and N. Huu Ninh. 2007. Asia. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson (eds). Cambridge University Press. Cambridge, UK. pp. 469 – 506.
- Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO). 2006. Climate change in the Asia/Pacific Region. Canberra, Australia, CSIRO.
- Cooper, D.M., W.B. Wilkinson, N.W. Arnell. 1995. The effects of climate changes on aquifer storage and river baseflow. *Hydrol. Sci. J.-J. Sci. Hydrol.* 40(5): 615-631.
- Croley, T.E. and C.L. Luukkonen. 2003. Potential effects of climate change on ground water in Lansing, Michigan. *J. Am. Water Resour. Assoc.* 39(1): 149-163.
- Dhawan, B.D. 1989. Studies in Irrigation and Water Management. New Delhi, Commonwealth Publishers.
- Global Water Partnership. 2000. Towards water security: a framework for action, GWP, March 2000.
- Goel, A.K. and R. Kumar. 2005. Economic analysis of water harvesting in a mountainous watershed in India. *Agricultural Water Management* 71: 257–266.
- Gould, J.E. 1992. Rainwater Catchment Systems for Household Water Supply, Environmental Sanitation Reviews, No. 32, Bangkok, ENSIC, Asian Institute of Technology.
- Green, T.R., B.C. Bates, S.P. Charles and P.M. Fleming. 2007. Physically based simulation of potential effects of carbon dioxide–altered climates on groundwater recharge. *Vadose Zone J.* 6:597–609.
- Gunatilaka, A. 2005. Groundwater woes of Asia. *Asian Water*, January/February.
- Hiscock, K. and Y. Tanaka. 2006. Potential impacts of climate change on groundwater resources: From the High Plains of the U.S. to the flatlands of the U.K. National Hydrology Seminar 2006 Water Resources in Ireland and Climate Change.
- IGES. 2007. *Sustainable groundwater management in Asian cities: A final report of research on sustainable water management policy*. Hayama: Institute for Global Environmental Strategies.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 1998. The regional impacts of climate change: an assessment of vulnerability.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2001. Climate Change 2001. Impacts, adaptation and vulnerability. Chapters 10, 11, 17 and 18. Contribution of Working Group II to the 3rd Assessment Report of the IPCC.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2007. Climate Change 2007 - Impacts, Adaptation and Vulnerability Working Group II contribution to the Fourth Assessment Report of the IPCC.
- International Human Dimensions Programme (IHDP). 2007. The implications of global environmental change for human security in coastal urban areas. ICSU/ISS/UNU.
- INCID (Indian National Committee on Irrigation and Drainage). 1999. Water for Food and rural development 2025. Paper presented at the PODIUM Workshop, Central Water Commission, New Delhi, India. 15-16 December.
- Jackson, R.B., E. G. Jobbágy, R. Avissar, S. B. Roy, D. J. Barrett, C. W. Cook, K. A. Farley, D. C. le Maitre, B. A. McCarl, B. C. Murray. 2005. Trading water for carbon with biological carbon sequestration. *Science* 310, 1944; DOI: 10.1126/science.1119282

- Kataoka, Y., G. Herath, K. Hara, S. Ohgaki. 2006. Rationalisation of industrial sector water use is the key to sound groundwater management. Policy Brief. Hayama: Institute for Global Environmental Strategies.
- Kemper, K. E. 2007. Instruments and institutions for groundwater management. In *the agricultural groundwater revolution: Opportunities and threats to development*, edited by M. Giodano and K.G. Villholth, pp. 153 – 172. Oxford University Press.
- Kundzewicz, Z. W., L. J. Mata, N. W. Arnell, P. Döll, P. Kabat, B. Jiménez, K.A. Miller, T. Oki, Z. Sen, & I.A. Shiklomanov (2007) Freshwater resources and their management. In: *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (ed. by M. L. Parry, O. F. Canziani, J. P. Palutikof, P. J. van der Linden & C. E. Hanson), 173–210. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Li, Y. 2001. Groundwater recharge. Nanjing Institute of Hydrology and Water Resources, China.
- Loaiciga H.A., D.R. Maidment, and J.B. Valdes. 2000. Climate-change impacts in a regional karst aquifer, Texas, USA. *J. Hydrol.* 227(1-4): 173-194.
- Morris, B.L., A.R.L. Lawrence, P.J.C. Chilton, B. Adam, R.C. Calow and B.A. Klinck. 2003. Groundwater and its susceptibility to degradation: A global assessment of the problem and options for management. *Early Warning and Assessment Report Series, RS 03-3*. United Nations Environment Programme, Nairobi, Kenya.
- Mukherji A. and T. Shah. 2005. 'Socio-Ecology of Groundwater Irrigation in South Asia: An Overview of Issues and Evidence', in *Selected Papers of the Symposium on Intensive Use of Groundwater*, held in Valencia (Spain), 10-14 December 2002, IAH Hydrogeology Selected Papers, Balkema Publishers.
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). 2003. *OECD Workshop on the Benefits of Climate Policy: Improving Information for Policy Makers*, Organisation for Economic Co-operation and Development.
- Pandey, P.K., S.N. Panda, L.P. Pholane. 2005. Economic evaluation of rainwater harvesting in on farm reservoirs for the integrated farming system - a sustainable approach for small farmers. *Environment and Ecology*, 2005 (Vol. 23) (No. 3) 671-675.
- Philippines National Water Resource Board. 2004. *Water resource assessment for prioritized critical areas (Phase I)*. Final Report, Metro Manila, Philippines.
- Qureshi, R.H. and E.G. Barrett-Lennard. 1998. *Saline agriculture for irrigated lands in Pakistan: A handbook*. ACIAR Monograph No. 50, Canberra.
- Scanlon, B. R., K.E. Keese, A.L. Flint. 2006. Global synthesis of groundwater recharge in semiarid and arid regions. *Hydrological Processes*, 20: 3335–3370.
- Shah, T., A.D. Roy, A.S. Qureshi and J. Wang. 2001. *Sustaining Asia's groundwater boom: An overview of issues and evidence*. German Development Institute and International Water Management Institute.
- Sharma, B. R. and V.U. Smakhtin. 2006. *Potential of water harvesting as a strategic tool for drought mitigation*. International Water Management Institute (IWMI).
- Stern, N. 2006. *The Stern Review on the Economics of Climate Change*. HM Treasury, UK. Cambridge University Press. [http://www.hm-treasury.gov.uk/independent\\_reviews/stern\\_review\\_economics\\_climate\\_change/sternreview\\_index.cfm](http://www.hm-treasury.gov.uk/independent_reviews/stern_review_economics_climate_change/sternreview_index.cfm)
- Sundaravadivel, M., J. Kandasamy and S. Vigneswaran. 2006. *Policy and design issues in rainwater harvesting: Case study in South Asia*. Rainwater harvesting & management (RWHM), The 2nd International RWHM Workshop, 11 September, 2006, Beijing.
- Takeda, T., A. Wongureng, S. Takizawa, W. Choompolkul, S. Chaimongkol, and S. Wattanachira. 2007. *Assessment of fluoride intake, excretion, and health effects in Chiang Mai Basin, Thailand*. Presented at the Fifth International Symposium on Southeast Asian Water Environment, Chiang Mai, Thailand, 7-9 November 2007.
- United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). 2007. *National Adaptation Programmes of Action (NAPA)*, [http://unfccc.int/national\\_reports/napa/items/2719.php](http://unfccc.int/national_reports/napa/items/2719.php) (accessed 11 April 2008).
- United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). 2008. *Climate Change: Impacts, vulnerabilities and adaptation in developing countries*. [http://unfccc.int/files/essential\\_background/background\\_publications\\_htmlpdf/application/txt/pub\\_07\\_impacts.pdf](http://unfccc.int/files/essential_background/background_publications_htmlpdf/application/txt/pub_07_impacts.pdf) (accessed 30 January 2008).
- United Nations/World Water Assessment Programme (UN/WWAP). 2003. *UNWorldWater Development Report: Water for People, Water for Life*. UNESCO (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organisation) and Berghahn Books, Paris, New York and Oxford.

- United Nations Environment Programme (UNEP). 2002. Global Environment Outlook 3. Nairobi, Kenya, United Nations Environment Programme.
- UNEP-IETC Urban Environment Series. 2002. Rainwater harvesting and utilization, an environmentally sound approach for sustainable urban water management. UNEP-DTIE-IETC/Sumida City Government/People for Promoting Rainwater Utilization.
- Water for Asian Cities Programme (WAC), India – UN-HABITAT and Directorate of Urban Administration & Development Government of Madhya Pradesh (DUADGMP). 2007. Measures for ensuring sustainability of rainwater harvesting. WAC/UN-HABITAT/ DUADGMP.
- Water Environment Partnership in Asia (WEPA). 2007. <http://www.wepa-db.net/policies/state/china/groundwater.htm>.
- Wassmann, R., N.X. Hien, C.T. Hoanh, and T.P. Tuong. 2004. Sea Level Rise affecting Vietnamese Mekong Delta: Water Elevation in Flood Season and Implications for Rice Production. *Climatic Change* 66 (1):89-107
- World Bank. 2006. Analisis comparative de politicas relacionadas con el productividad del agua. Working Paper No. 2. Seriede Agua de Mexico. Report No. 36854. Available at <http://www.wateryear2003.org> (accessed 15 January 2008).
- Xu, H. and X. Xuan. 2008. Report on SWMP II case study of Tianjin, Groundwater Quality Management; SWMP Case Study on Tianjin, unpublished working paper.
- Yusoff, I., K.M. Hiscock and D. Conway. 2002. Simulation of the impacts of climate change on groundwater resources in eastern England. In: Hiscock K.M., M.O. Rivett and R.M. Davidson (eds) Sustainable Groundwater Development. Geological Society, London, Special Publications, 193: 325-344.

