

11. 西安市における流域水資源需給将来予測に関する研究

A Study of Water Resource Supply and Demand Forecast in Xian City

大西 暁生* 小澤 亮輔** 森杉 雅史* 奥田 隆明* 井村 秀文*
Akio Onishi Ryosuke Ozawa Masafumi Morisugi Takaaki Okuda Hidefumi Imura

ABSTRACT: During the last two decades, Yellow River Basin witnessed serious water resource shortage, which has become serious constraint on economic development and caused various negative impacts on ecological system. In this study, water resource supply and demand are analyzed for Xian City which is located at Wei River Valley, the tributary of Yellow River. Then the Water-Resource Forecast Model based on the socio-economic database assesses the annual agriculture, industry and domestic water demand scenarios from 2000 to 2050.

KEYWORDS; Water Resource Shortage, Water Resource Supply and Demand, Water-Resource Forecast Model

1. はじめに

現在中国では、工業を中心とした急速な経済発展のもと、社会システムの変化、対外貿易の拡大など、中国国内だけではなくグローバルな範囲で変容を見せている。このような中国において、国民生活、食料、産業、経済などを支える水資源問題は世界の重要な関心事であると言えよう。本研究では、この位置づけのもと、黄河流域に位置する西安市に着目し研究を行った。西安市は、人口 700 万人程の都市であり、隣接する都市と併せると 1500 万人以上になる。東部地域と西部地域を結ぶ重要な中継地点であり、交通、情報、金融などの経済都市としての機能も果たしている。現在、中国政府は中西部の発展に力を入れており、その中心地となっているのが西安市である。政府の中西部発展政策の第一が、西安市に新たな産業を育成することであり、内外からの企業投資も促進されている。このような西安市の産業を支えていくためにも水資源の確保は重要である。しかし、西安市の一人あたりの年間の水資源量は約 387m³(黄河全流域は約 500m³)と世界平均の約 20 分の 1 と非常に少ない。しかも、食糧確保のための農業水準の維持と発展、工業生産量の増加、人口の増大、都市化の進行など、水資源の需要も増加しており、早急な対策が必要とされている。本研究の目的は、現状を評価し将来の水需給の予測を行うことである。そのため、公開されている統計書類や公報類を利用して水資源需給量の定量化を試みた。

2. 西安市の概要

2.1 西安市の地理的・気候的状况

西安市は、図-1 に示すように、北緯 33 度 39 分～34 度 44 分、東経 107 度 40 分～109 度 49 分に位置しており、「八千里の米糧川」と呼ばれる黄河支流の渭河流域(関中平原)に属している。西安市内の平均海拔は 424m であり、その総面積は 9,983km²である。陝西省の省都である西安は、8 つの区と 5 つの県(西安市轄区：新城区、碑林区、蓮湖区、霸橋区、未央区、雁塔区、閻良区、臨潼区、長安県、藍田県、周至県、戸県、高嶺県)から成り立っている。総人口 714 万人、そのうち市内人口はおよそ 300 万人を数える。温帯大陸性気候に属する西安市は、2000 年平均気温 14.5℃、2000 年平均降水量は 539.0mm 程であり、年間を通して比較的乾燥している地域である。2000 年において最も暑くなったのは 7 月であり、平均気温は摂氏 28.1 度、最高気温は摂氏 38.7 度である。

*名古屋大学大学院環境学研究科

** 名古屋市役所

2.2 セクター別水使用量

2000年の西安市水資源公報によるセクター別水使用量を図-2に示す。この表から、全水使用量はおよそ18億 m^3 であり、54.1%を農業用水として用いていることがわかる。工業用水(工業+郷鎮工業)は29.8%，生活用水(城鎮生活+農村生活)は16.1%であり、今後の経済成長によっては、これらのセクターにおける水需要の増加が見込まれる。

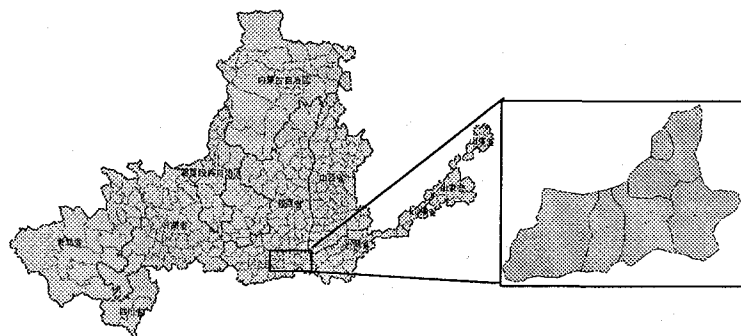


図-1 黄河流域における西安市の地理的位置

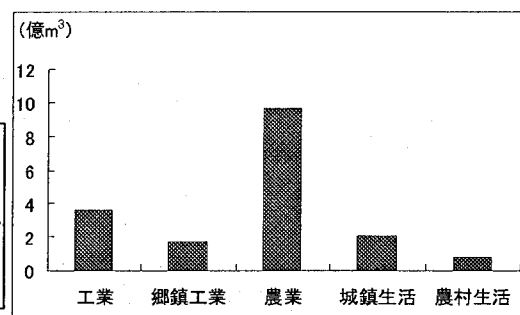


図-2 西安市のセクター別水使用量

2000年西安市水資源公報より

3. 水資源需要将来予測モデルの構築

3.1 モデルの概要

本研究で使用する水資源需要将来予測モデルは、入手可能なデータを用いて主に回帰分析によって構築される。本モデルは図-3のマクロフレームに示すように、経済社会マクロフレームと水資源需要モジュールに大別でき、水資源需要モジュールには農業用水、工業用水、生活用水の需給モジュールが組み込まれている。以下の節では、(1)経済社会マクロフレーム、(2)農業用水、(3)工業用水、(4)生活用水、(5)水供給モデルについてそれぞれ述べる。

3.2 経済社会マクロフレーム

本研究では、既存研究を参考に以下のような簡易シナリオを想定する。すなわち、2030年までについては、参考文献(13)で示されている陝西省の人口シナリオをそのまま採用する。次に、2030～2050年の期間については、省別に設定されたシナリオが存在しないため、まず2010～2030年の各省の成長率をそのまま用いて2050年の仮の省別人口(A)を求めた。しかし、2030～2050年の実際の人口成長率は2010～2030年の人口成長率より低下することが予想されるため、次式によって下方修正を行った。

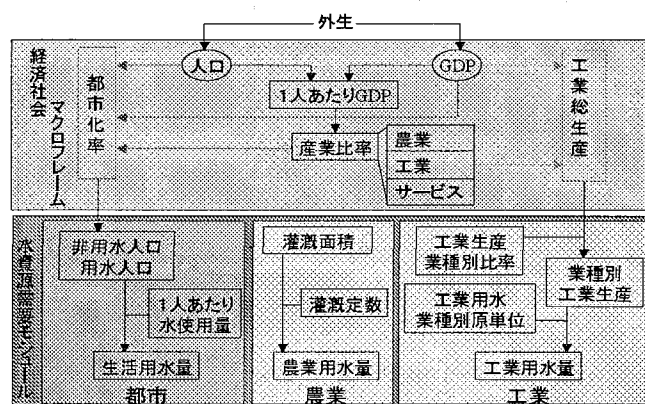


図-3 水資源需要将来予測モデルのマクロフレーム

$$2050\text{年の省別人口} = A \times \frac{B}{\sum A} \quad (1)$$

ここで、Bは全国人口増加率の値(-0.01%)を適用して得られる2050年の全国人口である。西安市の各市県別の人口予測に関しては、まず陝西省の1990～2000年の各市県別成長率で推計をし、その総和が式(1)で求めた陝西省の人口と一致するように補正を行った。また、西安市轄区に属する区においても、西安市轄区の人口の総和と過去のトレンドから求めた人口が整合するように補正をした。基盤変数のGDPについては参考文献(13)が示している

陝西省の GDP 成長率シナリオをそのまま採用し、西安市に属する各区県の GDP 予測に関しては人口推計と同様の方法で推計した。工業用水量の推計のためには工業総生産(あるいは、GDP に占める 2 次産業比率)の値、また、生活用水の推計のためには都市人口及び都市人口に占める非農業人口と農業人口の比率の値が基軸となるため、まず GDP に占める 1 次、2 次、3 次の各産業の比率を求める。ここでは西安市の各区県の時系列データを基に回帰分析を行い、各区県の 1 次、2 次、3 次産業のそれぞれの比率と 1 人あたり GDP の相関が高かったものの中から 2 つの産業について以下の推計式を用いて各々の産業比率を求め、後に残りの 1 産業の比率を求めた。

$$\ln((A \text{次産業比率})^{-1} - 1) = a \cdot \ln(1 \text{人あたり GDP}) + b \quad (2)$$

3.3 農業用水

農業用水量は、式(3)のように、灌漑定数(面積あたりの用水量)と有効灌漑面積を乗じることによって求められる。灌漑定数は、地域による自然条件や人為的な農業技術の差異などによって大きな違いがあるが、本研究ではデータの制約上、陝西省における灌漑定数を一様に用いて推計をした。

$$\text{農業用水量} = \text{有効灌漑面積} \times \text{灌漑定数} \quad (3)$$

ここで農業用水量の将来予測にあたり、2 つの仮定を設定する。第一に、西安市の有効灌漑面積は 1970 年頃からほぼ一定であることから、2000 年以降もこの傾向が続くものとする。第二に、灌漑定数は 2000 年を基準として表-1 のように節水型と自然体という 2 つのシナリオに応じて変化するものとする。節水型では、農業への投資や品種改良が促進し、農業の近代化が進み、灌漑定数が大きく低下する。一方で自然体では、現時点までの原単位の趨勢的な変化を今後も保持すると考える。

表-1 農業用水源単位の将来変化

	2010	2030	2050
灌漑定数(自然体)	-8.00%	-15.00%	-20.00%
灌漑定数(節水型)	-19.00%	-25.00%	-30.00%

3.4 工業用水

工業用水量は、単位工業生産当たり水使用量[m³/万元] (以下、工業用水原単位) に工業生産額[万元]を乗じることによって求められる。t 年の i 市における工業用水量 $WI_i(t)$ は、工業用水原単位 $wi_i(t)$ と工業総生産 $Y_i(t)$ を用いて次のように表わせる。

$$WI_i(t) = wi_i(t) \times Y_i(t) \quad (4)$$

公刊されている統計書類から西安市の工業用水量の推計に用いることができるデータには、①全国 19 産業部門の工業用水原単位 (中国環境年鑑)、②西安市の 39 部門の工業総生産値 (西安市統計年鑑)、③省別・流域別の工業用水原単位 (中国水資源広報 2000) がある。②のデータには西安市全体の工業生産額と 39 部門ごとの郷、規模以上の企業の工業生産額がある。しかし、39 部門ごとの郷、規模以下の企業の工業生産額データが存在しないため、その工業生産額の総和は不明である。そのため、まず、郷、規模以下の企業の工業生産額を西安市全体の工業生産額から郷、規模以上の企業の工業生産額を減ずることによって求め、郷、規模以下の企業の各部門産業比率は郷、規模以上の企業と同様とし、推計を行う。次に ①のデータに合うように、②の 39 部門を 19 部門に統合する。ここで求めた 19 部門ごとの工業総生産額と①の 19 部門ごとの工業用水原単位を乗じる事により、各区県別の工業用水量を推計した。工業生産額は 3.2 の経済社会マクロフレームに沿い、GDP と人口から一人当たり GDP を、さらに式(2)を用いて第 2 次産業比率を求め、推計する。工業用水原単位については、西安市の工業用水原単位が 2050 年に 1999 年の日本レベルになるという想定を置く。この時、年ごとの減少率は一定であるとした。

3.5 生活用水

生活用水量は、1人あたり水使用量(リットル/日・人)に人口を乗じて求められる。したがって、生活用水量の将来予測のためには、上水道にアクセスできる用水人口とアクセスできない非用水人口の予測が必要であり、以下では順に城市非農業人口と城市農業人口の値の将来予測、城市非農業人口及び城市農業人口に対する用水普及率の設定と用水人口、都市及び農村の人口1人当たり水使用量の設定、について説明する。

① 城市非農業人口と城市農業人口の値の将来予測

生活用水量を推計するためには、非農業人口と農業人口を算出する必要がある。そのために、市区県別の1991年から2000年の総人口、非農業人口、所得格差データを用い、以下の回帰式(5)を用いて非農業人口と農業人口を推計した。この回帰式の構造は、所得格差が大きいほど都市化が進むことを表している。なお、所得格差については、式(6)で定義する。

$$\ln \left(\left(\frac{\text{非農業人口}(t+1)}{\text{総人口}(t+1)} \right)^{-1} - 1 \right) = 5.52 \cdot \frac{\text{非農業人口}(t)}{\text{総人口}(t)} - 1.06 \cdot \text{所得格差} + 3.06 \quad (5)$$

R²値=0.99 (t値) (18.05) (-2.12) (11.89)

$$\text{所得格差} = \frac{\text{GDP} \cdot (\text{第2次産業比率} + \text{第3次産業比率})}{\text{非農業人口}} - \frac{\text{GDP} \cdot \text{第1次産業比率}}{\text{農業人口}} \quad (6)$$

② 城市非農業人口及び城市農業人口に対する用水普及率の設定と用水人口

2000年時点において既に97%(中国全体での平均)の用水普及率を示す城市非農業人口は、2010年に普及率100%になると仮定し、一方で、城市農業人口は2050年に100%となると仮定した。

表-2 用水普及率シナリオ

	2000年	2010年	2020年	2030年	2040年	2050年
城市非農業人口	97%	100%	100%	100%	100%	100%
城市農業人口	8%	26%	45%	63%	82%	100%

③ 都市及び農村の人口1人当たり水使用量の設定

表-3より、2000年における中国全体の都市及び農村の人口1人当たり水使用量と、西安市水資源公報による各々の使用量には大きな差異がある。これは、西安市における生活水準が中国全体での平均より高いことを示唆している。そのため、西安市の将来予測に関しては、参考文献(13)で予測されている中国全体の都市及び農村の人口1人当たり水使用量の時系列変化を保ちながら、2000年から向上し続けると仮定した。

表-3 都市生活用水量(上水道有り)と農村生活用水量(上水道無し)シナリオ

	2000年	2010年	2030年	2050年
都市生活用水(中国)	130.00	145.00	160.00	175.00
都市生活用水(西安市)	201.65	210.38	227.72	244.89
農村生活用水(中国)	54.00	65.00	80.00	100.00
農村生活用水(西安市)	52.14	61.19	79.17	96.97

3.6 水供給予測モデル

市県レベルでの水資源量は一般的に公表されていない。このため公報類から入手できる省レベルの値をもとに、市県レベルでの導出を試みる。まず、式(7)のように水資源量を定義する。

$$\text{水資源量} = (\text{降水量} - \text{可能蒸発散量}) \times \text{補正係数} \quad (7)$$

ここで降水量及び可能蒸発散量については、方らがMakkinkモデルから推計した黄河流域全体の結果を市県レベルで集計したものを用いる。補正係数とは、公報類の水資源量と集計値を整合させるためのものであるが、黄河流域に属する省での補正係数と可能蒸発散量と降水量との差については、以下のような統計的因果関係が認められる。

$$\text{補正係数} = -0.001 \cdot (\text{可能蒸発散量} - \text{降水量}) + 0.81 \quad (R^2 = 0.94) \quad (8)$$

この式を用いて、西安市の県市レベルでの補正係数を求めた後に水資源量を推測した。

4. 水資源需給将来予測結果

4.1 人口とGDP

陝西省の成長率は、2001年～2010年で0.66%、2010～2030年で0.58%、2030年～2050年で0.58%であり、これらを用いて陝西省に属する市区県ごとに過去のトレンドを基に重み付けし人口推測を行った。結果、2010年には全市で819万人、2030年には1161万人、2050年1642万人となる。GDPの推計結果は、西安市全体では、2000年比で2010年に2.18倍、2030年に8.03倍、2050年に19.95倍になった。

4.2 農業用水

全水使用量の5割を超える農業用水の節水は、水資源対策の中で最も重要な課題である。本研究においては、参考文献(13)に示されている灌漑定数の変化のみを用いた簡易的な推計方法によって将来予測を行っているが、単位面積あたりの水の使用量の削減は、灌漑施設の新設と補修、技術革新などによる生産性の向上、作物種の変換などによって可能である。

図-4より、2050年までの期間に節水努力を行うことで、自然体と比較して、およそ1億 m^3 の農業用水を削減することができる。このため、さらなる節水努力を行うことで、農業用水の削減を促進することができる。特に、図-5からわかるように、西安市轄区周辺の県などでは農業を主な産業としており、産業構造の変化や節水を行うことによって、水の使用量を削減することが可能であると考えられる。

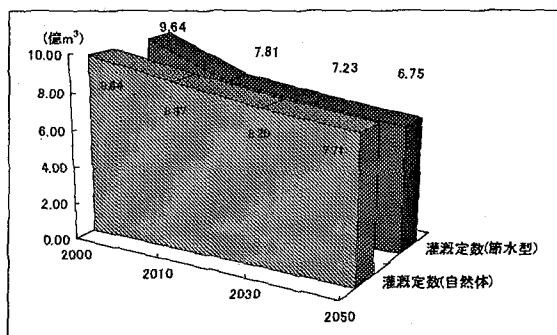


図-4 農業用水の将来予測結果

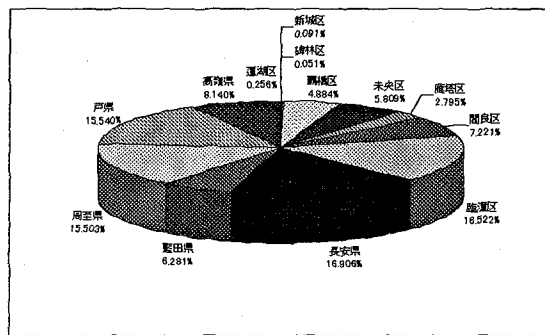


図-5 2000年各区県別の農業用水量割合

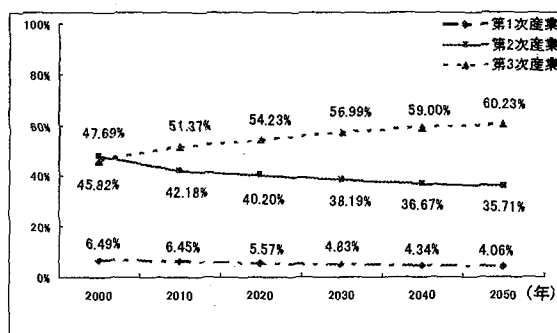


図-6 産業比率の将来予測結果

表-4 工業用水の将来予測結果 (億 m^3)

	工業用水量
2000年	5.99
2010年	9.41
2030年	14.59
2050年	18.24

4.3 工業用水

図-6からわかるように、西安市全体では工業化が進展し、今後第3次産業が伸びていくと推測がされる。しかし、この傾向は西安市轄区において強く、市轄区周辺の県においては第2次産業の進展、つまり工業化が進む傾向にある。工業用水の推計結果を表-4に示す。西安市全体では、2050年には2000年比で約3倍に工業用水量が増加

する。これは、第2次産業の比率は低下していくが、GDPの成長率が高いため工業用水量が増加していくことを表している。そのため、今後は水資源の新たな確保と技術革新による水の回収率の向上を促していく必要がある。

4.4 生活用水

2000年において、西安市水資源公報の生活用水量が2.87億 m^3 であったことから考えると、表-5の推計結果は多少過剰となっている。これは、西安市の用水普及率が不明であり、中国全体の平均的な普及率を用いて推計を行ったためである。将来予測の結果、西安市では都市化と生活水準の向上によって、生活用水量の需要が増加し、水資源を圧迫することは必至である。また、生活用水は飲料水などにも多く利用されており、その質的要因から再利用水を使うことは困難であり、新たな水資源の確保が必要である。

表-5 生活用水量の将来推計結果 (億 m^3)

	2000年	2010年	2030年	2050年
西安市轄区	2.15	3.58	7.12	12.59
長安県	0.26	0.42	0.59	0.60
藍田県	0.18	0.29	0.42	0.45
周至県	0.17	0.29	0.43	0.47
戸県	0.18	0.27	0.39	0.40
高嶺県	0.07	0.11	0.16	0.17
合計	3.00	4.96	9.10	14.68

4.5 水供給量

西安市の各市県における水資源量の結果を表-6に示す。この結果、西安市全体の水資源量は13.41億 m^3 程度である。周至県の年間降雨量は668.48mmと西安市で最も多く、行政区域も2,956 km^2 と全市面積の27.17%を占めているため水資源量が最大となっている。

表-6 水資源量 (億 m^3)

西安市轄区	3.21
長安県	1.97
藍田県	2.59
周至県	3.86
戸県	1.48
高嶺県	0.30

4.6 水資源需給量

2000年の西安市水資源公報で発表されている水使用量の合計は17.83億 m^3 である。本研究で用いた水資源需要将来予測モデルでの計算結果が18.63億 m^3 であったことからモデルの妥当性がほぼ確認される。また、全水使用量におけるセクター間の割合も農業用水51.7%、工業用水32.2%、生活用水16.1%と、西安市水資源公報での農業用水54.1%、工業用水29.8%、生活用水16.1%と差異がない。図-7の結果より、2000年時点で既に水需要量は推計水資源量を超過している。また今後、農業用水以外は増加する結果となっており、特に、工業用水や生活用水の増加はさらに水資源不足を助長すると考えられ早急な対策が必要である。

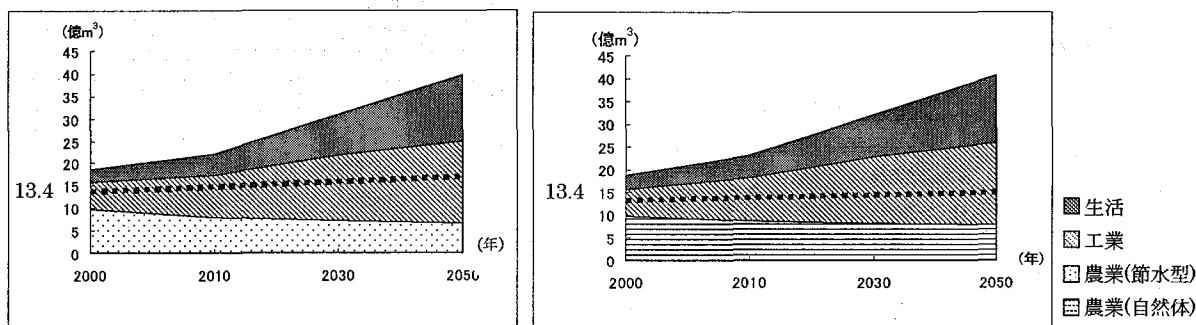


図-7 水資源需要量のセクター別結果

5. 結論

本研究では、西安市の水資源需給量を定量的に把握するために、基礎的な水資源需要将来予測モデルを用いて2050年までのセクター別用水量の推計を行った。その結果、2000年で既に水資源不足が起こっており、今後さらに深刻化することがわかった。特に、急速な経済発展と産業構造の変化、それと共に引き起こされる生活水準の向上によって、工業用水、生活用水は著しく増加し、水資源を圧迫することが明確となった。その一方で、農業用水量は低下するが、人口増大による食料不足問題が新たな障害になると考えられる。西安市における水資源問題は、節水や水の再利用を含め、その有効利用と新たな水資源確保が急務であることが明白となった。

謝辞

本稿作成に至って、名古屋大学大学院博士課程に在籍する方偉華氏、並びに幡野貴之氏に全面的なご協力をいただいた。また、本研究室の研究員であった澤津直也氏の業績に拠る所が大きい。ここで記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 井村秀文：中国北部水資源問題の実情と課題に係る調査報告，平成 13～14 年度名古屋大学受託研究(国際協力銀行)
- 2) 小澤亮輔，小川茂，方偉華，井村秀文(2003)：中国黄河流域の水資源需要将来予測に関する研究，第 31 回環境システム研究論文発表会講演集，pp.295-302
- 3) 金子慎治，三枝裕司，松本亨，井村秀文(1998)：中国の長期的水需要予測，第 6 回地球環境シンポジウム講演論文集，pp.315-322
- 4) 三枝裕司，金子慎治，陳晋，井村秀文(1998)：黄河流域の水資源需給に関する基礎的研究，第 26 回環境システム研究，pp.501-506
- 5) 三枝裕司，金子慎治，井村秀文(1999)：中国黄河の流域水資源管理の課題，第 27 回環境システム研究，pp.127-133
- 6) 国家统计局国名経済綜合統計司(1999)：新中国五十年統計資料集編，中国統計出版社
- 7) 水利部黄河水利委員会(1998)：黄河年鑑 1998，黄河年鑑社
- 8) 水利部南京水文水資源研究所・中国水利水電科学研究院水資源研究所（1998）：21 世紀中国水供求，中国水利水電出版社
- 9) 全国政協人口資源環境委員会(2000)：西部大開發及水資源文集，中国水利水電出版社
- 1 0) 中華人民共和國国家統計局：各種統計年鑑，中国統計出版社
- 1 1) 中華人民共和國水利部(1997-2000)：中国水資源公報
- 1 2) 西安市水資源公報(1999-2001)
- 1 3) 錢正英，張光斗他(2001)：中国可持續發展水資源戰略研究報告集第 1～9 卷，中国水利水電出版社
- 1 4) 方偉華，井村秀文(2003)：COMPARISON OF EMPIRICAL PET ESTIMATION METHODS IN THE YELLOW RIVER BASIN，第 31 回環境システム研究論文集，pp.217-225
- 1 5) Brown, L.R (1995)：誰が中国を養うのか？，訳者：今村奈良臣，ダイヤモンド社
- 1 6) 朱曉原，張学成(1999)：黄河水資源变化研究，黄河水利出版社
- 1 7) China Agenda for Water Sector Strategy for North China (2001): World Bank
- 1 8) Smil,V(2003): 世界を養う，食料・農業政策研究センター