

研究種目：基盤研究 (B)

研究期間：2007～2009

課題番号：19310004

研究課題名 (和文)

扇状地における水循環構造の変遷と水資源利用秩序の再構築に関する研究

研究課題名 (英文)

Changes of water cycle structure and its effect on water resource development in fans

研究代表者

唐 常源 (TANG CHANGYUAN)

千葉大学・大学院園芸学研究科・教授

研究者番号：80251198

研究成果の概要 (和文)：

扇状地は地球に広く分布し、水に恵まれているため、都市が数多く発達している。地下水資源開発・管理を行うために、扇状地における水循環、地下水流動、水質変動、地下水年齢を把握することが重要である。特に、経済発展に伴う水資源問題を抱えている扇状地に関する水循環研究は少ない。本研究はまず扇状地水循環に関する地下水流動系、そして表層水と地下水の交流関係を調べた。次に流動系に沿って水質変動、特に硝酸イオン濃度分布を調査し、地域の水質形成プロセスを明らかにした。また、地下水年齢を把握するために、既存のトリチウムを用いる手法に CFCs や SF₆ と組み合わせるという新しい手法を用いた。その事例研究として、扇状地の涵養域である山地における降雨浸透プロセス、大規模な灌漑が局地地下水流動系の水質にどのような影響を与えているのかを評価した。研究期間中に太行山扇状地、黄河扇状地およびそれらからなる複合扇状地での地下水および河川水を採取し、主要イオン濃度、硝酸、水素・酸素安定同位体、窒素同位体 (¹⁵N)、トリチウム、CFCs などを測定し、以下のような重要な結果を得ている。

1) 太行山扇状地では降水の涵養の影響を受け、水質組成は Ca-HCO₃ 型となっている。また黄河扇状地の地下水は Ca-HCO₃ 型、Na-HCO₃ 型から Na-SO₄ 型に変化している。2) CFC-12 とトリチウムにより算出された南部黄河扇状地の地下水年代は 23～50 年の範囲にある。3) 浅層地下水の硝酸の起源は主に窒素化学肥料と堆肥によるものが ¹⁵N によって判明された。また、地下水の硝酸イオン濃度および ¹⁵N 同位体の分析結果を総合すると、南部黄河扇状地での地下水に脱窒プロセスの存在が示唆された。4) 黄河水を利用した灌漑の結果は地下水の塩分が著しく溶脱し、地下水質組成が Na-SO₄ 型から Ca-Na-HCO₃ 型に変化した。その塩分溶脱前線の進行速度は 200m/年と推定される。

研究成果の概要 (英文)：

Most of cities in the world are developed at alluvial fans in piedmont or along the river. With the developing of economy and industry and the increasing of population, quality and quantity of groundwater are aggrieved by over-exploitation in these areas. In order to address the problem of realistic assessment of groundwater resources potential and its sustainability, it is vital to understand the recharge sources, flow system, hydro-geochemical evolution and the age of groundwater in the alluvial fan. As a main economic center, there are two main alluvial fans in west and south of the North China Plain (NCP). One is the Taihang Mts. alluvial fan, the another is the Yellow River alluvial fan, which can be divided into north and south wings by the Yellow River. However, few studies have paid attentions to water cycle in these fans. The objectives in this dissertation are to understand the water cycle concerning recharge sources, and interaction between surface water and groundwater; to make clear hydro-geochemical evolution in fans through which groundwater flows, especially, the fate and transport of nitrate; and to date groundwater age using new method – CFCs (Chlorofluorocarbons) combining with tritium. Several case studies also have been carried out to present rainfall-infiltration processes in

mountain area, as well as the long-term effects of irrigation diversion water on the local groundwater system. Groundwater and surface water from local rivers, located at these alluvial fans, were collected for analyzing major ions, nitrate concentration, stable isotope (oxygen-18 and deuterium) compositions, nitrogen isotope (^{15}N), tritium and CFC-12 measurements in the study period. The main conclusions are:

- 1) Recharged by precipitation, groundwater in the Taihang Mts. alluvial fan is characterized by $\text{Ca}\cdot\text{HCO}_3$ water type. Ion exchange and absorption effect are expected to the groundwater evolution in the Yellow River alluvial fan. From the mountainous area, to Taihang Mts. alluvial fan, and to the north Yellow River alluvial fan, the groundwater undergoes the evolution from $\text{Ca}\cdot\text{HCO}_3$, $\text{Na}\cdot\text{HCO}_3$, to $\text{Na}\cdot\text{SO}_4$.
- 2) The groundwater age in the south Yellow River alluvial fan ranged from 23 to 50 years dating by the CFC-12 and tritium.
- 3) Identified by ^{15}N , the main sources of nitrate in the shallow groundwater came from nitrogen chemical fertilizer and manure use. The nitrate concentrations in the complex alluvial fan were over the drinking water standard. In the south Yellow River alluvial, however, denitrification exists in the recharge process of river water to groundwater.
- 4) The diversion water for irrigation from the Yellow River is freshening the local groundwater remarkably. The freshening front in the shallow groundwater can be estimated to advance at a rate of 200 m/year. This means that it will take, at least, another 45 years to change the groundwater composition in the entire study area from $\text{Na}\cdot\text{SO}_4$ water type to $\text{Ca}\cdot\text{Na}\cdot\text{HCO}_3$ water type.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	7,800,000	2,340,000	10,140,000
2008 年度	5,100,000	1,530,000	6,630,000
2009 年度	2,500,000	750,000	3,250,000
年度			
年度			
総計	15,400,000	4,620,000	20,020,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：環境学・環境動態

キーワード：物質循環、扇状地、水文環境、地下水年齢、CFC

1. 研究開始当初の背景

扇状地は地球上に多く分布し、扇状地は、山地と平野部の接続部として、地形形成、河川発達、古気候の研究などにも重要な位置を示している。水循環の観点からみると、扇状地では山地からの表流水のかなりの部分が地下を流れ、伏流水となり、表流水流量は減る。扇状地は、地表水と地下水交流の重要な場として、ユニークな水循環構造を持っている。また、その構造を知るために扇状地における水収支、水の滞留時間及び物質の移動速度に関する情報は水循環構造を理解するために必要不可欠である。

一方、豊富な地下水を持つ扇状地は農業、工業、都市が集中し、人間活動の最も強い地域の一つと言える。水利用は扇状地環境と住

民生活に大きな影響を与えるだけでなく、地域の水資源開発・利用秩序を大きく変貌させた。そこで、水循環に関わる流域共生は、新しい手法による水循環速度の推定、地下水と地表水交流関係、水循環構造、及び窒素挙動のメカニズムを解明する必要がある。

一方、扇状地における比較的深度の浅い浅層地下水については、滞留時間が数年から数十年と短いものであるため、より精度の高い滞留時間の推定方法が求められている。地下水の滞留時間推定には、水に含まれる様々な物質をトレーサーとして用いる方法が有効であり、これまで様々な物質が利用されてきた。近年、CFCs(クロロフルオロカーボン類)をトレーサーとして地下水滞留時間を推定することが注目され、アジア地域におけるそ

の実用化が課題となっている。

2. 研究の目的

- (1) CFCs、SF₆ 等を用いた地下水年齢推定法の確立
- (2) 流域水循環を研究するために、水質、同位体、地球化学などマルチトレーサー法の研究及びその実用化
- (3) 扇状地の水循環特性の解明
- (4) 人間活動による扇状地における水循環構造の改変

3. 研究の方法

(1) 文献調査を通じ、地下水中の CFCs、SF₆ に関する研究現状および問題点を整理した。それに基づき、CFC s (CFC-11、CFC-12、CFC-113) および SF₆ に関する採水方法、濃縮精製方法、分析方法および解析方法という一連スキームが完成・実用化された。

採水する際は、ステンレス容器中に採水瓶をセットする。サンプル水が銅製導管を通し、採水瓶にいれる。水が採水瓶から溢れだし、ステンレス容器が水で満杯となるまで待つ。そして、外気と触れないよう水中で採水瓶をキャップで締める。また、金属キャップの裏に付いているゴム材からフッ素の溶出を防ぐため、アルミ箔でガラスビンの口を覆ってからキャップを締める。

試作した濃縮ラインはその役割から、サンプル導入部、溶存 CFCs 分離部、標準ガス導入部、CFCs 捕集・濃縮部、GC・ECD による検出部の 5 つに大きく分けることができる。採取された水の CFCs・SF₆ 濃度は ECD 付ガスクロマトグラフィー (GC-14A、島津製作所) を用いて、表 1 で示された分析条件で測定した。

表 1 CFC s および SF₆ に関する分析条件

Item	SF ₆	CFCs
Trap column	Res-sil C (5cm) 、 Porapak T (5cm)	
Cooling Temp	-70°C	-40°C
Heating temp	95°C	95°C
Main column	MS-5A (300cm)	Res-sil C (300cm)
Pre-column	MS-5A (50cm)	Res-sil C (30cm)
Column temp	55°C	75°C
Injector temp	120°C	120°C
Det. temp	300°C	250°C

(2) 中国半湿潤・半乾燥地域である華北平原西側に位置する黄河扇状地、太行山扇状地およびその両者からなる複合扇状地を対象として、人間活動影響の大きい扇状地における水循環・水質進化プロセスを調査・研究をした。その際に、石家庄、保定、新郷地域および賈魯河流域を選び、扇状地の地表水、湧水及び地下水を採

取し、主要化学成分、CFC s 類物質及び窒素、酸素、水素同位体分析を行った。水の化学成分分析には ICP、イオンクロマト及びガスクロマトを、安定同位体分析は質量分析計をそれぞれ使用した。

(3) 扇状地における水循環現状を把握するために、流域内の富栄養化元素であるリンや窒素、POP s などの分布状況の調査を実施した。

4. 研究成果

(1) 採水方法、濃縮精製方法、分析方法および解析方法の研究開発という一連の過程を通して、CFC および SF₆ を用いた滞留時間推定に関するサンプリング前処理—分析スキームを確立した。千葉市、松戸市、市川市、手賀沼流域の湧水を採集し、実証実験を行った。その結果、千葉県市川市、千葉市、松戸市における低地湧水の年齢を測定したところ、台地における地下水の滞留時間はおよそ 20~30 年である結果が得られた。

中国河北省保定地域の扇状地、賈魯河流域の黄河扇状地から採集した地下水の CFCs 濃度を測定し、概ねよい結果が得られた。淮河上流における黄河扇状地の一部である賈魯河流域では、浅層と深層地下水年齢はそれぞれ 23 年から 50 年以上であることが分かった。表 2 は賈魯河流域における地下水の CFC-12 およびトリチウム濃度から推定された地下水年齢比較一覧表である。それを見ると、二つの方法から得られた結果がほぼ同じであり、CFC による地下水年齢推定精度が確認され、その実用化ができた。

表 2 CFC-12 およびトリチウム濃度から推定された地下水年齢比較一覧表 (賈魯河流域)

Aquifer	Reach	³ H (Year)	CFC-12 (Year)
Shallow aquifer	Upper	25±3	-
	Middle	23±1	31
	Lower	25	23
Deep aquifer	Upper	31	38
	Middle	>55	-
	Lower	>55	50

(2) 水素、酸素同位体を用いて扇状地の涵養域である山地での降雨浸透特性を調べた。図 1 は中国科学院遺伝・發育研究所石家庄農業資源センター太行山山地実験場で異なる二種類植生 (robinia と grass) 斜面における土壌水同位体 δ¹⁸O の垂直分布を示す。それによると、同位体 δ¹⁸O に与える植生の影響がほぼ同じであり、蒸発効果の影響深度は約 110 cm であることが分かる。また、土壌水の同位体値の変化からこの地域では、大雨時期のみ降雨が地下水へ涵養できることが示唆された。

110cm以深地層に浸透した雨水が最終的に地下水へ涵養する。それによって年間土壌水の浸透速度は90~110cm/年であることも推定された。

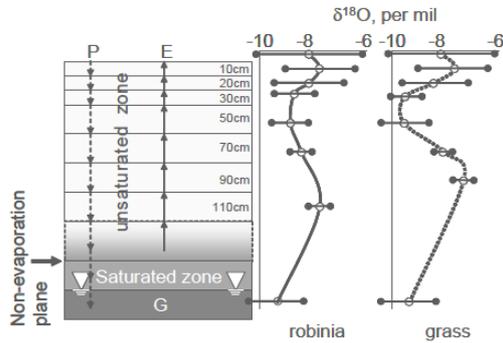


図1 植生の異なるサイトにおける土壌水の酸素同位体 $\delta^{18}\text{O}$ の垂直プロファイル

(3) 太行山に沿って多くの扇状地が分布している。また、扇状地平野は洪積扇状地および沖積扇状地からなり、両者は互いに積み重ねている。扇状地地層の粗砂礫層に象のような哺乳動物化石および樹木破片が見つかり、 ^{14}C 年代測定の結果から、それは25000~13000年前のものであることがわかった。また、レス層にはダチョウ卵の化石があり、地表には新石器時代の遺跡も発見された。洪積扇状地の浸食谷に堆積した泥および泥炭の ^{14}C 年代は7200~2200年前のものであり、中全新世に堆積したことが判明された。また、古河川の谷地にあるレス、細砂および現代河川の谷地にある細砂は全新世に堆積したものである。

11000年前の気候は寒冷であり、植生は主に草原であり、森林もあつた。山麓にはサイ、象などのような寒さに強い草食哺乳類動物がいた。海面低下に伴う浸食基準面の低下によって、陸域勾配が増大した。河川は流量が少なかったが、その変動率が大きく、洪水時の増水が激しいという特徴を持っていた。風化速度も加速し、土砂流出量も多くなり、河川は浸食状態となった。その結果、浸食谷および第四浸食面が形成された。その後、急速な堆積作用によって、山麓および平野部にそれぞれ砂礫洪積扇状地および砂質古河床が形成された。

(4) 滹沱河は太行山麓洪積扇状地から流れている重要な河川の一つである。早全新世早期に、滹沱河の河川幅と河川水深の比は63.6で、彎曲率は1.14、河床の縦勾配は0.99‰であった。年平均洪水流量が1968.7 m^3/s で、年平均流量が24.1 m^3/s であり、両者の比率は80にも達した。中全新世に、河川幅と河川水深の比は7.82で、彎曲率は2.18、河床の縦勾配は0.4‰で、やや曲がっている様子が呈した。1919年~1978年までの北中水文観

測所での観測結果、滹沱河の年平均流量と年平均洪水流量はそれぞれ29.3 m^3/s および364.7 m^3/s であった。早全新世早期に比べると、現在の年平均流量は5.2 m^3/s 多く、年平均洪水流量は六分の一になった。また、中全新世に比べると、現在年平均流量と年平均洪水流量はそれぞれ五分の二および四分の一になった。つまり、早全新世早期は河川流量の変動が大きく、気候も変わりやすく、乾燥と湿潤時期は交互となり、地下水への涵養にとっては不利であった。中全新世には年平均洪水流量と年平均流量の比率は20強であり、河川流量の変動が少なく、気候条件も安定した。地下水への地表水の涵養があるため、地域の地下水が形成された。1970年代以後に、ダム建設、地下水過剰揚水のため、扇状地の地下水位の低下は石家荘および保定地域で顕著に見られた。

一方、黄河扇状地および太行山扇状地からなる複合扇状地に属する新郷地域では長期間にわたって、黄河の水が農地灌漑に使われてきた。灌漑の結果、調査対象地域黄河水に入れ替われ、その水質も黄河水と似てきた。その影響で灌漑地域の地下水質は確実に変わってしまった。

地下水の酸素、水素安定同位体、トリチウムおよび一般水質を分析した結果、対象地域の地下水は浅層および深層の2深度で異なる特徴を示す。また、水質進化パターンの分布から地下水の涵養域、中間域および流出域が同定できた。特に、過去30年間黄河水の灌漑影響が流出域の水質を大きく変えた。同位体 $\delta^{18}\text{O}$ と $\delta^2\text{H}$ の結果から複合扇状地における地下水と地表水の交流関係を明らかにした(図2)。

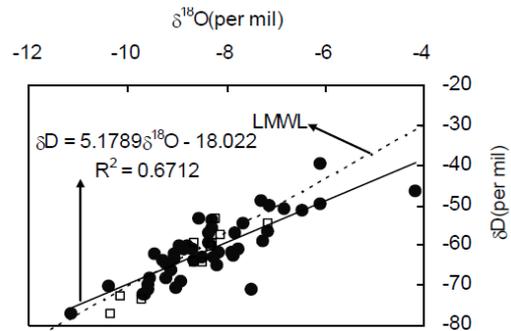


図2 黄河水に依存する灌漑地域における同位体 $\delta^{18}\text{O}$ と $\delta^2\text{H}$ の相関 (●地下水、□河川)

(5) 太行山、黄河および灌漑の影響を受けて、扇状地での地下水流動および水質進化が複雑な様子を呈した。地下水質は太行山扇状地では Ca-HCO_3 型で、黄河扇状地では Ca-HCO_3 型および Na-HCO_3 型、複合扇状地では Na-SO_4 型のように変化していく(図3)。一方、黄河を境にして南北二つの地下水流動系が形成されていた。特に河

川沿いの浅層地下水が雨期に洪水に涵養されたことを示唆した。また、北部地下水流動系では、黄河水によって灌漑された地域での地下水質組成はNa-SO₄型からCa-Na-HCO₃型大きく変わった。黄河水を利用した灌漑地域において、長期的な灌漑の結果、調査対象地域黄河水に入れ替われ、その水質も黄河水と似てきた。また、黄河水の灌漑効果として浅層地下水の塩分が著しく溶脱された。その塩分溶脱前線の進行速度は200m/年と推定される。これは調査地における地下水質組成がすべてNa-SO₄型からCa-Na-HCO₃型に変化するのに少なくとも更には45年間に要することを示唆した。

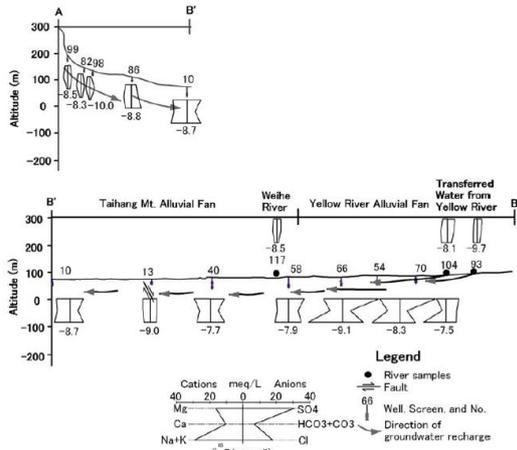


図3 黄河複合扇状地における水質タイプ

(6) 扇状地における地下水における硝酸態窒素分布特徴および形成機構について、水質・同位体などのマルチトレーサー手法を用いて、地下水流動系と硝酸態窒素分布の関係を検討した。

全体的に、地下水における硝酸態窒素濃度が涵養域および流出域で高く、中間域で低い。これは水質、同位体比の分布及び土地・水・肥料利用の変化とも一致し、農業活動が特に浅層地下水の硝酸態窒素の分布に影響を及ぼしていることを明らかにした。さらに、地下水中の硝酸態窒素の起源を窒素同位体で検討した結果、化学肥料・有機肥料、汚水灌漑および畜産・生活排水に起因する地域の地下水中の¹⁵N値がそれぞれ、-2~-10‰、7-11‰、10-20‰に分布される。また、地下水の硝酸イオン濃度および¹⁵N同位体の分析結果を総合すると、南部黄河扇状地での地下水に脱窒プロセスの存在が示唆された。

一方、保定を含む太行山扇状地では、過去40年間汚水灌漑を実施してきた地域の地下水を調査した。酸素同位体などを用いて、地下水の硝酸の起因が汚水灌漑であることを判明した。また、汚水灌漑地域およびその下流域では、40mより浅い井戸の殆どは地下水中の硝酸態窒素濃度が飲料水基準を超えた。さらに、地下水の¹⁵N値より、汚水灌漑に起

因する硝酸態窒素の分布が広い範囲を及ぼしていたことを実証した。このことは、地域の地下水質へ与えた汚水灌漑の長期的な影響を明らかにした。また、工業排水貯蔵ダムからの漏洩に起因する地下水有機物汚染も判明した。

(7) 経済発展に伴い、扇状地の水質も大きく変化した。特に黄河扇状地である賈魯河流域では、その上流に鄭州という大都市があり、そこから出された都市排水のほとんどが賈魯河へ流れている。その結果、過去二十数年間、地下水および河川水には溶存酸素が低く、還元状態である。本研究の調査期間に、採集された河川水および地下水からアンモニア窒素、硝酸態窒素およびフェノール類物質が検出された。鄭州市で、NP, OPおよびBPA濃度が最大となり、その流下過程で低下してきたが、底質中のフェノール類物質がむしろ下流の方が高く含まれる傾向にある。これは、河川におけるフェノール類物質の分布が水-固体間にその配分特性だけでなく、流域の洪水頻度にも関係していることを示唆した。

(8) さらに、本研究はこれまで筆者らが行われてきた乾燥地域、半乾燥地域及び湿潤地域の水循環特性に関する他の調査結果と比較してみると、次のような認識を得た。

- ① これまで地域の水循環研究は水収支に留まっているが、人間活動の影響が強い地域では、水循環構造そのものが変わってしまったために、それを解明する研究手法は至急確立する必要がある。
- ② 水資源開発の観点から見ると、水資源利用秩序は気候帯によって異なるが、人間活動の影響を大きく受けるという点においては同じである。そのメカニズムを解明するために、自然要因と区別させ、水循環への人間活動影響を抽出し、客観的に評価する指標が新たに必要とされている。
- ③ 扇状地は流域水循環にとって、重要な地形ユニットのひとつであり、地球温暖化に対しても敏感に反応している。また、世界各地で見られるように、扇状地には、政治、経済、都市化など人間活動も盛んな地域であり、水環境問題も深刻化している。その根源は水循環構造に対する理解不足、水資源利用秩序と水循環の間に生じた不条理にある。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計10件)

1. Zhang Y., Tang C., Song X., Li F., 2009. Behavior and fate of alkylphenols in surface water of the Jialu River, Henan

Province, China. *Chemosphere*, 77 : 559–565.

2. Yu J., Yang C., Liu C., Song X., Hu S., Li F., Tang C. 2009. Slope runoff study in situ using rainfall simulator in mountainous area of North China. *J. Geogr. Sci.*, 19: 461-470.

3. Wu P., Tang C., Zhu L., Liu C., Cha X., Tao X., 2009. Hydrogeochemical characteristics of surface water and groundwater in the karst basin, southwest China. *Hydrol. Process.* **23**, 2012–2022.

4. Wu P., Tang C., Liu C., Zhu L., Pei T., Feng L., 2009. Geochemical distribution and removal of As, Fe, Mn and Al in a surface water system affected by acid mine drainage at a coalfield in Southwestern China. *Environ. Geol.* 57:1457–1467.

5. Li F., Pan G., Tang C., et al., 2008. Recharge source and hydrogeochemical evolution of shallow groundwater in a complex alluvial fan system, southwest of North China Plain. *Environ. Geol.*, 55(5): 1109-1122.

6. Li F., Song X., Tang C., et al., 2007. Tracing infiltration and recharge using stable isotope in Taihang Mt., North China. *Environ. Geol.*, 53:687–696.

7. Li F., Tang C., Yang Y., et al., 2008. Nitrate contamination of groundwater in the alluvial fans of the Taihang Mts. and Yanshan Mts. In: GQ07: Securing Groundwater Quality in Urban and Industrial Environments. IAHS Publ. 324: 79-85.

8. Li F., Tang C., Zhang Q., et al., 2008. Surface water-groundwater interactions in a Yellow River alluvial fan. *Surface Water–Groundwater Interactions: Process Understanding, Conceptualization and Modeling*. IAHS Publ. 321:189-196.

9. Li F., Song X., Tang C., Kondoh A. and Zhang W., 2008. Stable isotopic characterization of precipitation, soil water and groundwater in Taihang Mountain, north China, IAHS-AISH Publication 319, pp. 83-90.

10. Lu Y., Tang C., Chen J., Song X., Li F., Sakura Y., 2008. Spatial characteristics of water quality, stable isotopes and tritium associated with groundwater flow in the Hutuo River alluvial fan plain of the North China Plain. *Hydrogeology Journal*, 16(5): 1003-1015.

[学会発表] (計 7 件)

1. Zhang Y., Tang C., Li F., Song X., Dun Y.,

Fukumoto K., 2009. Historical record of substituted phenols in groundwater of the Jialu River, Henan province, China, 日本地下水学会2009年春季講演会講演要旨

2. 橋本勇氣、浅野暢之、唐常源、福本幸一郎 2009. SF6・CFCs を用いた地下水滞留年代推定方法についての考察, 日本地下水学会 2009年春季講演会講演要旨

3. Li F., Tang C. Zhang Y., 2007. Hydrogeology characteristics and pollution of surface water and groundwater in the upper reaches of Huaihe River, China. 2007 日本地下水学会 2007 年秋季講演会講演要旨

4. Li F., Zhang Q., Tang C., et al. 2007. Recharge sources and evolution of groundwater in Taihang Mt. alluvial fan, North of China: by isotopic and hydrochemical methods. 36th IAH, Lisbon, (Poster presentation)

5. Li F., Tang C., Kondoh A., et al. 2007. Surface water-groundwater interactions in irrigation area transferred water from the Yellow River. 日本地下水学会 2007 年春季講演会講演要旨

6. Li F., Tang C., Zhang Q., et al. 2007. Surface water-groundwater interactions in a Yellow River alluvial fan. IUGG XXIV, perugia, Italy.

7. Li F., Tang C., Yang Y., et al. 2007. Nitrate contamination of groundwater in the alluvial fans of Taihang Mt. and Yanshan Mt. the 6th International IAHS Groundwater Quality Conference (Fremantle, Western Australia)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

唐 常源 (TANG CHANGYUAN)

千葉大学・大学院園芸学研究所・教授

研究者番号：80251198

(2) 研究分担者

佐倉 保夫 (SAKURA YASUO)

千葉大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：70153947

近藤 昭彦 (KONDO AKIHIKO)

千葉大学・環境リモートセンシング研究センター・教授

研究者番号：70153947