

厚生労働科学研究費補助金（健康安全・危機管理対策総合研究事業）
「水道の基盤強化に資する技術の水道システムへの実装に向けた研究」
分担研究報告書

水質管理等の強化に関する既存技術および将来技術の文献調査と課題抽出

研究分担者 国立保健医療科学院 島崎 大

研究要旨

海外の文献調査に基づき、水道水源および水道施設等におけるリモートセンシング技術やドローン技術の利活用状況について最新動向を把握し、課題点を抽出した。人工衛星やドローン等のプラットフォームを用いたセンシングならびに画像解析技術が、水源水域においては藍藻類の監視や増殖の予測、高濁水の発生につながる土壌流出の可能性が高い地域の抽出等に、水道施設においては水道管路等の漏水検知や地下埋設物の調査等に、それぞれ活用されていた。当技術により、広域あるいは到達困難な箇所における水源水質の把握や漏水検出等が、従来よりも短期間、省コストかつ省力的に実現できる可能性があり、今後の水道の基盤強化を支える技術群の一つとして活用することが望ましいと考えられた。

A. 研究目的

水質（代替）指標項目の連続測定や、小型水質センサー等の導入、深層学習等による早期水質予測といった先端的な開発技術を水道水源から給水末端に至る水質管理に活用することで、水道事業者の限られた技術系職員数であっても効果的かつ効率的な水質管理が可能となり、さらには従来よりも高度な水質管理が可能になると考えられる。本年度は、海外の文献調査に基づいて、人工衛星やドローン等による撮影画像を活用した広域リモートセンシング技術の開発に関する最新動向および課題点を抽出し、明らかにすることを目的とした。

B. 研究方法

国立保健医療科学院内にて利用可能な学

術文献データベース（Web of Science Core Collection）を用い、下記キーワードにて文献検索を実施した。

- ①水道水源 リモートセンシング：
drinking AND water AND source AND remote AND sensing
- ②水道管 リモートセンシング：
water AND pipe and AND remote AND sensing
- ③水道水 ドローン
drinking AND water AND {UAV OR UAS}
NOT arsenic

ヒットした 307 文献のうち、要旨や結論等の内容から判断して、当研究の趣旨に該当しない文献を除外し、64 文献を選定した。その内訳は以下の通りであった。

- ①水道水源・リモートセンシング：49 文献
- ②水道管・リモートセンシング：11 文献
- ③水道水・ドローン：4 件

C. 調査結果

(1)水道水源におけるリモートセンシング技術の利活用

i)藍藻類および関連指標の監視

水道水源における藍藻類の増殖は、藍藻類によるかび臭原因物質等の放出により浄水中の異臭味を生じるだけでなく、藍藻毒による健康影響の面からも、諸外国で懸案となっている。藍藻類を対象とした研究例が数多くみられた(1-21)。リモートセンシングの手法として、クロロフィル a (葉緑体) やフィコシアニン(色素タンパク)といった藍藻類の代替指標となる化学物質を対象としていた。

また、藍藻類の増殖に関わる因子の一つである、窒素やリンといった栄養塩類を対象とした適用事例が報告されていた(22-25)。そのうち、Song らの研究では、水道水源である米国モース貯水池の栄養塩濃度を現場測定データならびに航空機から観測した多波長スペクトルデータより推定、各測定データを、遺伝的アルゴリズム部分最小二乗法を用いたモデル式に適用し、全窒素及び全リン濃度と関連付けた。実測値との間に高い相関が確認され、これらの結果に基づいて、モース貯水池における栄養塩の分布と濃度を測定することができるとした。クロロフィル a 濃度、懸濁物質と、リモートセンサーで評価された各栄養塩との相関が認められたことより、栄養塩が藻類増殖のトリガーとなっている各貯水池において、当手法が適用できると結論づけた(25)。

Almuhtaram らは、水源水域の藍藻類監視および早期警戒手法に関するレビューを行うと共に、以下の3段階の手法ならびに早期警戒システムにおけるマルチバリア手法の導入を提案した(26)。

段階①：水源水域における微生物活性監視

指標：透明度・色度・濁度・クロロフィル a・ATP 等

手法：目視・ドローン・濁度計・透明度計・色度計・蛍光分光計・ATP測定装置 等

段階②：藍藻類の直接的な確認

指標：藍藻類・フィコシアニン

手法：顕微鏡観察・フィコシアニン抽出分析・フィコシアニン蛍光分析・細胞自動イメージング・リモートセンシング・次世代シーケンシング・バイオセンサー

段階③：藍藻産生物の検出

指標：藍藻毒(シアノトキシン)

手法：酵素免疫測定法(ELISA)・定量PCR・クロマトグラフィー

ii)水質監視・予測・モデリング

湖沼等の閉鎖水域での一般的な水質項目を対象に、水質予測や水質モデリングに適用した事例が多く報告されていた(27-34)。一方、リモートセンシングにより有害化学物質や病原微生物の指標の監視を試みる事例は限られており、塩素要求量および消毒副生成物生成能(35)、病原性細菌・真核生物(36)、下痢症発生の指標としての大腸菌(37)が挙げられた。

このうち、塩素要求量および消毒副生成物生成能について(35)、著者らは米国ミネソタ州内24箇所の地表水試料を採取し、ラボ実験により着色溶存有機物(CDOM・440nm

吸光度で評価)・溶存有機物(DOM)・SUVA と、塩素要求量・トリハロメタン (THMs) 生成能・ハロ酢酸 (HAAs) 生成能を比較し、CDOM との間に良好な相関性を確認した。Landsat8 衛星画像より算出される CDOM 濃度から判断すると、同州内水源の 21.8%のみが THMs・HAAs 双方の最大許容濃度を満たすと推定された。地表水の着色が大きい場合には、CDOM 濃度および消毒副生成物生成能は過小評価となった。

iii) 土壌流出・高濁水発生

集中豪雨などにより生じる土壌流出を予測し脆弱な水源地域を推定する、あるいは、水源での高濁水の発生を予測する事例が、複数報告されていた 38-41)。Zhou らは、土壌流出モデル式である Universal Soil Loss Equation (USLE)の改良により、中国・朝白川上流域の土壌流出性を評価した。既往の地形・降雨・土質データに加えて、衛星画像 (Landsat-7 ETM+) およびモデル式により植生分布データを算出、土地利用の状況も推定を行った。各結果から土壌流出の深刻度を 6 段階で評価し、流出が深刻な地域における推定流出量を算出した 40)。

iv) 地下水量・融雪量の推定

降雪地帯における融雪量 42,43)や、地下水の貯水量 44-47) を推定する事例がみられた。後者には、米国 NASA による重力観測衛星 Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) の観測データが用いられていた。Huo らは、GRACE の陸域総貯水量と、その再解析データである Global Land Data Assimilation System (GLDAS) の陸水蒸発散モデルを用い、中国黄土平原における 2002-2014 年の地下水水源量の変動を推定した。GRACE による地下水層の厚みの推定

値は、特に年間変動において、地下水位の実測値と良好な相関が見られるとした。また、推定期間において地下水水源量は一貫して減少し、その減少速度は加速していると推定され、要因として人口増加や農業・工業活動の発展が示唆された 44)。

v) 開発途上国におけるモニタリング

入手可能なデータが限られている開発途上国の農村域等を対象に、リモートセンシングのデータを活用し、水・衛生に関する普及状況を調査する例があった 48-49)。

(2) 水道施設の健全性調査等におけるリモートセンシング技術の利活用

i) 漏水調査

人工衛星、航空機、ドローン等を利用し、水道管路等の漏水調査を短期間・省力・省コストで実施する事例が多く見受けられた 50-55)。

Jean-Claude らは、3 バンド(可視光、近赤外、熱赤外)のリモートセンシングを使用して地中の漏水の検知を試みた。ここで、可視光: 土壌の黒ずみ、近赤外光: 土壌に含まれる水分の比誘電率の反射特性、熱赤外光: 土壌の表面温度の低下の検知を目的とした。分解能 0.5m を達成するため、プラットフォームには航空機またはドローンを用いた。フランスとポルトガルの配水管網上にて、人為的な漏水を作ったうえで実証実験したところ、おおよそ 50%の確率で漏水イベントを検出できた 50)。

Chen らは、Landsat8 衛星画像と深層学習を用いて開水路の漏水を自動検知する手法の検討を行った。深層学習に使用したパラメータは、いずれも衛星画像から得られる地表温度、植生被覆分布、温度植生乾燥指数

とした。訓練データとして、2016～2019年の点検時に収集したコンクリート表面検査記録を使用した。都市部と農村部の両方を流れる開水路について収集したデータセットを用い、再現率 86%、精度 86%、正確度 85%を達成できたとした 51)。

Arsenio らは、地表面で生じる歪みにより水道管にストレスが加わり漏水件数が増加すると仮定し、2009,2012年の各衛星画像により、オランダ国内の地表面の歪みを2種類の方法で評価した。また、水道事業者より40ヶ月間の漏水事例、水道管の種類、敷設期間を入手し比較した。管種によらず、地表面の歪みに従って漏水率は増大した。特に、50年以上経過する老朽アスベスト管の漏水率が高かった 52)。

ii) 地下埋設物調査

漏水調査と同様、地下に埋設された経年管等の所在を確認するための調査研究が数多くみられた 56-60)。その際に主に用いられるセンシング技術は地中レーダ (GPR: Ground-Penetrating Radar) であったものの 57,59,60)、伝導率および磁化率 58)、赤外線および RGB 画像データ 56)を用いる例もあった。

(3) ドローン技術の利活用

配水塔の健全性調査 61)、衛星画像データと組み合わせた小規模貯水池の水質モニタリング 62)、水源水域の土壌流出 63)や化学物質流出の調査 64)等、現地での調査が困難となる場所を中心に、短期間かつ省力的にデータ収集が行われていた。

D. 考察

(1) 水道水源におけるリモートセンシング技

術の利活用

水道水源を対象とした事例として、水源の水質監視、とりわけ、藍藻類および関連指標を対象とした検討が数多く報告されていた。Almuhtaram らが提案した水源水域における藍藻類監視手法のうち、段階③: 藍藻毒の直接的な検出はできないものの、段階①: 微生物活性指標のうち透明度・色度・濁度・クロロフィル a、段階②藍藻類のうちフィコシアニンはリモートセンシングによる測定が可能であり、機械学習やモデリング等と組み合わせることで、藍藻類増殖の予知や早期検出を可能にすると考えられた。

また、適用事例は限られるものの、豪雨時に土壌の流出が生じやすい水源水域を事前に特定することで、将来的な豪雨災害への予防対策を講じることができると考えられた。

(2) 水道施設の健全性調査等におけるリモートセンシングやドローン技術の利活用

人工衛星に限らず有人・無人航空機やドローン等の様々なプラットフォームを活用し、水道管路や開水路等の漏水調査、地下埋設物の存在調査、水源水域における監視等が行われていた。各プラットフォームと対象物との距離が近いほど、得られる画像情報の解像度は高くなるものの、調査範囲は狭くなるため、調査目的や対象の規模に応じて、適切なプラットフォームならびに使用可能なセンサーを選択することが重要と考えられた。

なお、Arsenio らによる調査研究では、人工衛星に搭載された合成開口レーダ(SAR)画像を用いた干渉 SAR(InSAR)解析により、年間数ミリ程度の地表面の変位が検出可能であったとした 52)。GPS 技術によっても、同

程度の精度による調査が可能との報告もあり(65)、広範囲にわたって高精度の調査を可能とする、リモートセンシング技術のさらなる進展が注目される。

E. 結論

海外の文献調査に基づき、水道水源および水道施設等におけるリモートセンシング技術やドローン技術の利活用状況について最新動向を把握し、課題点を抽出した。人工衛星やドローン等のプラットフォームを用いたセンシングならびに画像解析技術の活用により、広域あるいは到達が困難な箇所における水源水質の把握や漏水検出等が、従来よりも短期間、省コストかつ省力的に実現できる可能性があり、水道の基盤強化を支える技術群の一つとして活用することが望ましいと考えられた。一方、リモートセンシングに用いられるセンサーやプラットフォームは多種多様であるため、調査目的や対象規模に即した、適切な選択が重要であると考えられた。

F. 研究発表

1. 論文発表

(該当なし)

2. 学会発表

(該当なし)

G. 知的財産権の出願・登録状況(予定を含む)

1. 特許取得

(該当なし)

2. 実用新案登録

(該当なし)

3. その他

(該当なし)

参考文献

- 1) Coffey, MM; Schaeffer, BA; Foreman, K; Porteous, A; Loftin, KA; Stumpf, RP; Werdell, PJ; Urquhart, E; Albert, RJ; Darling, JA. Assessing cyanobacterial frequency and abundance at surface waters near drinking water intakes across the United States, WATER RESEARCH, 2021, 201, 117377.
- 2) Song, KS; Li, L; Tedesco, LP; Li, S; Hall, BE; Du, J. Remote quantification of phycocyanin in potable water sources through an adaptive model. ISPRS JOURNAL OF PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING. 2014, 95, 68-80.
- 3) Wu, JY; Hilborn, ED; Schaeffer, BA; Urquhart, E; Coffey, MM; Lin, CJ; Egorov, AI. Acute health effects associated with satellite-determined cyanobacterial blooms in a drinking water source in Massachusetts. ENVIRONMENTAL HEALTH, 2021, 20(1), 83.
- 4) Gorham, T; Root, ED; Jia, YY; Shum, CK; Lee, J. Relationship between cyanobacterial bloom impacted drinking water sources and hepatocellular carcinoma incidence rates. HARMFUL ALGAE, 2020, 95, 101801.
- 5) Zhang, F; Hu, CL; Shum, CK; Liang, S; Lee, J. Satellite Remote Sensing of Drinking Water Intakes in Lake Erie for Cyanobacteria Population Using Two MODIS-Based Indicators as a Potential Tool for Toxin Tracking. FRONTIERS IN MARINE SCIENCE, 2017, 4, 124.
- 6) Song, KS; Lu, DM; Li, L; Li, SA; Wang, ZM;

- Du, J. Remote sensing of chlorophyll-a concentration for drinking water source using genetic algorithms (GA)-partial least square (PLS) modeling. *ECOLOGICAL INFORMATICS*, 2012, 10, 25-36.
- 7) Duan, HT; Tao, M; Loisel, SA; Zhao, W; Cao, ZG; Ma, RH; Tang, XX. MODIS observations of cyanobacterial risks in a eutrophic lake: Implications for long-term safety evaluation in drinking-water source. *WATER RESEARCH*, 2017, 122, 455-470.
- 8) Song, KS; Li, L; Tedesco, L; Clercin, N; Hall, B; Li, S; Shi, K; Liu, DW; Sun, Y. Remote estimation of phycocyanin (PC) for inland waters coupled with YSI PC fluorescence probe. *ENVIRONMENTAL SCIENCE AND POLLUTION RESEARCH*, 2013, 20(8), 5330-5340.
- 9) Ali, KA; Ortiz, J; Bonini, N; Shuman, M; Sydow, C. Application of Aqua MODIS sensor data for estimating chlorophyll a in the turbid Case 2 waters of Lake Erie using bio-optical models. *GISCIENCE & REMOTE SENSING*, 2016, 53(4), 483-505.
- 10) Keith, D; Rover, J; Green, J; Zalewsky, B; Charpentier, M; Thursby, G; Bishop, J. Monitoring algal blooms in drinking water reservoirs using the Landsat-8 Operational Land Imager. *INTERNATIONAL JOURNAL OF REMOTE SENSING*, 2018, 39(9), 2818-2846.
- 11) Agha, R; Cires, S; Wormer, L; Dominguez, JA; Quesada, A. Multi-scale strategies for the monitoring of freshwater cyanobacteria: Reducing the sources of uncertainty. *WATER RESEARCH*, 2012, 46(9), 3043-3053.
- 12) Xue, K; Zhang, YC; Ma, RH; Duan, HT. An approach to correct the effects of phytoplankton vertical nonuniform distribution on remote sensing reflectance of cyanobacterial bloom waters. *LIMNOLOGY AND OCEANOGRAPHY-METHODS*, 2017, 15(3), 302-319.
- 13) Almuhtaram, H; Kibuye, FA; Ajjampur, S; Glover, CM; Hofmann, R; Gaget, V; Owen, C; Wert, EC; Zamyadi, A. State of knowledge on early warning tools for cyanobacteria detection. *ECOLOGICAL INDICATORS*, 2021, 133, 108442.
- 14) Mishra, S; Stumpf, RP; Schaeffer, BA; Werdell, PJ; Loftin, KA; Meredith, A. Measurement of Cyanobacterial Bloom Magnitude using Satellite Remote Sensing. *SCIENTIFIC REPORTS*, 2019, 9, 18310.
- 15) Huang, CC; Li, YM; Sun, DY; Le, CF. Retrieval of Microcystis aetginosa Percentage From High Turbid and Eutrophia Inland Water: A Case Study in Taihu Lake. *IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING*, 2011, 49(10), 4090-4100.
- 16) Nas, B; Karabork, H; Ekercin, S; Berkta, A. Mapping chlorophyll-a through in-situ measurements and Terra ASTER satellite data. *ENVIRONMENTAL MONITORING AND ASSESSMENT*, 2009, 157(1-4), 375-382.
- 17) Song, KS; Li, L; Li, S; Tedesco, L; Hall, B; Li, ZC. Hyperspectral retrieval of phycocyanin in potable water sources using genetic algorithm-partial least squares (GA-PLS) modeling. *INTERNATIONAL JOURNAL OF APPLIED EARTH OBSERVATION AND*

- GEOINFORMATION, 2012, 18, 368-385.
- 18) Song, KS; Li, L; Li, S; Tedesco L; Duan HT; Li, ZC; Shi, K; Du, J; Zhao, Y; Shao TT. Using Partial Least Squares-Artificial Neural Network for Inversion of Inland Water Chlorophyll-a. IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING, 2014, 52(2), 1502-1517.
- 19) Mishra, S; Stumpf, RP; Schaeffer, B; Werdell, PJ; Loftin, KA; Meredith, A. Evaluation of a satellite-based cyanobacteria bloom detection algorithm using field-measured microcystin data. SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT, 2021, 774, 145462.
- 20) Tao, M; Duan, HT; Cao, ZG; Loiselle, SA; Ma, RH A. Hybrid EOF Algorithm to Improve MODIS Cyanobacteria Phycocyanin Data Quality in a Highly Turbid Lake: Bloom and Nonbloom Condition. IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN APPLIED EARTH OBSERVATIONS AND REMOTE SENSING, 2017, 10(10), 4430-4444.
- 21) Matson, PG; Boyer, GL; Bridgeman, TB; Bullerjahn, GS; Kane, DD; McKay, RML; McKindles, KM; Raymond, HA; Snyder, BK; Stumpf, RP; Davis, TW. Physical drivers facilitating a toxigenic cyanobacterial bloom in a major Great Lakes tributary. LIMNOLOGY AND OCEANOGRAPHY, 2020, 65(12), 2866-2882.
- 22) Wang, GQ; Li, JW; Sun, WC; Xue, BL; Yinglan, A; Liu, TX. Non-point source pollution risks in a drinking water protection zone based on remote sensing data embedded within a nutrient budget model. WATER RESEARCH, 2019, 157, 238-246.
- 23) Zheng, YX; Wang, QY; Zhang, X; Yu, JS; Li, C; Chen, LW; Liu, Y. Nitrogen and Phosphorus Retention Risk Assessment in a Drinking Water Source Area under Anthropogenic Activities. REMOTE SENSING, 2022, 14(9), 2070.
- 24) Chang, NB; Imen, S; Vannah, B. Remote Sensing for Monitoring Surface Water Quality Status and Ecosystem State in Relation to the Nutrient Cycle: A 40-Year Perspective. CRITICAL REVIEWS IN ENVIRONMENTAL SCIENCE AND TECHNOLOGY, 2015, 45(2), 101-166.
- 25) Song, K; Li, L.; Tedesco, L., Li, S.; Shi, K.; Hall, B; Remote Estimation of Nutrients for a Drinking Water Source Through Adaptive Modeling, WATER RESOURCES MANAGEMENT, 2014, 28, 2563–2581.
- 26) Almuhtaram, H; Kibuye, FA; Ajampur, S; Glover, CM; Hofmann, R; Gaget, V; Owen, C; Wert, EC; Zamyadi, A. State of knowledge on early warning tools for cyanobacteria detection. ECOLOGICAL INDICATORS, 2021, 133, 108442.
- 27) Coskun, HG; Yalcin, G. Water quality determination of Buyukcekmece lake, turkey by using remote sensing and GIS techniques, FRESINIUS ENVIRONMENTAL BULLETIN. 2014, 23(3), 746-750.
- 28) Gu, Q; Deng, JS; Wang, K; Lin, Y; Li, J; Gan, MY; Ma, LG; Hong, Y. Identification and Assessment of Potential Water Quality Impact Factors for Drinking-Water Reservoirs. INTERNATIONAL JOURNAL OF ENVIRONMENTAL RESEARCH AND

- PUBLIC HEALTH, 2014, 11(6), 6069-6084.
- 29) Chang, NB; Yang, YJ; Goodrich, JA; Daranpob, A. Development of the Metropolitan Water Availability Index (MWAI) and short-term assessment with multi-scale remote sensing technologies. JOURNAL OF ENVIRONMENTAL MANAGEMENT, 2010, 91(6), 1397-1413.
- 30) Miao, S; Liu, C; Qian, BJ; Miao, Q. Remote sensing-based water quality assessment for urban rivers: a study in linyi development area, ENVIRONMENTAL SCIENCE AND POLLUTION RESEARCH, 2020, 27(28), 34586-34595.
- 31) Soomets, T; Uudeberg, K; Jakovels, D; Zagars, M; Reinart, A; Brauns, A; Kutser, T. Comparison of Lake Optical Water Types Derived from Sentinel-2 and Sentinel-3. REMOTE SENSING, 2019, 11(23), 2883.
- 32) Giri, S. Water quality prospective in Twenty First Century: Status of water quality in major river basins, contemporary strategies and impediments: A review. ENVIRONMENTAL POLLUTION, 2021, 271, 116332.
- 33) Al-Shaibah, B; Liu, XP; Zhang, JQ; Tong, ZJ; Zhang, MX; El-Zeiny, A; Faichia, C; Hussain, M; Tayyab, M. Modeling Water Quality Parameters Using Landsat Multispectral Images: A Case Study of Erlong Lake, Northeast China. REMOTE SENSING, 2021, 13(9), 1603.
- 34) Wang, SL; Li, JS; Zhang, B; Lee, Z; Spyrakos, E; Feng, L; Liu, C; Zhao, HL; Wu, YH; Zhu, LP; Jia, LM; Wan, W; Zhang, FF; Shen, Q; Tyler, AN; Zhang, XF. Changes of water clarity in large lakes and reservoirs across China observed from long-term MODIS. REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 2020, 247, 111949.
- 35) Chen, YL; Arnold, WA; Griffin, CG; Olmanson, LG; Brezonik, PL; Hozalski, RM. Assessment of the chlorine demand and disinfection byproduct formation potential of surface waters via satellite remote sensing. WATER RESEARCH, 2019, 165, 115001.
- 36) Oliva, A; Garner, RE; Walsh, D; Huot, Y. The occurrence of potentially pathogenic fungi and protists in Canadian lakes predicted using geomatics, in situ and satellite-derived variables: Towards a tele-epidemiological approach. WATER RESEARCH, 2022, 209, 117935.
- 37) Robert, E; Grippa, M; Nikiema, DE; Kergoat, L; Koudougou, H; Auda, Y; Rochelle-Newall, E. Environmental determinants of E. coli, link with the diarrheal diseases, and indication of vulnerability criteria in tropical West Africa (Kapore, Burkina Faso). PLOS NEGLECTED TROPICAL DISEASES, 2021, 15(8), e0009634.
- 38) Fraser, RH; Warren, MV; Barten, PK. Comparative-evaluation of land-cover data sources for erosion prediction. WATER RESOURCES BULLETIN. 1995, 31(6), 991-1000.
- 39) Gong, WF; Liu, TD; Duan, XY; Sun, YX; Zhang, YY; Tong, XY; Qiu, ZX. Estimating the Soil Erosion Response to Land-Use Land-Cover Change Using GIS-Based RUSLE and Remote Sensing: A Case Study of Miyun Reservoir, North China. WATER, 2022, 14(5), 742.

- 40) Zhou, WF; Wu, BF. Assessment of soil erosion and sediment delivery ratio using remote sensing and GIS: a case study of upstream Chaobaihe River catchment, north China. *INTERNATIONAL JOURNAL OF SEDIMENT RESEARCH*, 2008, 23(2), 167-173.
- 41) Cao, ZG; Duan, HT; Shen, M; Ma, RH; Xue, K; Liu, D; Xiao, QT. Using VIIRS/NPP and MODIS/Aqua data to provide a continuous record of suspended particulate matter in a highly turbid inland lake. *INTERNATIONAL JOURNAL OF APPLIED EARTH OBSERVATION AND GEOINFORMATION*, 2018, 64, 256-265.
- 42) Woodruff, CD; Qualls, RJ. Recurrent Snowmelt Pattern Synthesis Using Principal Component Analysis of Multiyear Remotely Sensed Snow Cover. *WATER RESOURCES RESEARCH*, 2019, 55(8), 6869-6885.
- 43) Smith, T; Bookhagen, B; Rheinwalt, A. Spatiotemporal patterns of High Mountain Asia's snowmelt season identified with an automated snowmelt detection algorithm, 1987-2016. *CRYOSPHERE*, 2017, 11(5), 2329-2343.
- 44) Huo, AD; Peng, JB; Chen, XH; Deng, L; Wang, GL; Cheng, YX. Groundwater storage and depletion trends in the Loess areas of China. *ENVIRONMENTAL EARTH SCIENCES*, 2016, 75(16), 1167.
- 45) Nigussie, W; Hailu, BT; Azagegn, T. Mapping of groundwater potential zones using sentinel satellites (-1 SAR and-2A MSI) images and analytical hierarchy process in Ketar watershed, Main Ethiopian Rift. *JOURNAL OF AFRICAN EARTH SCIENCES*, 2019, 160, 103632.
- 46) Feng, W; Shum, CK; Zhong, M; Pan, Y. Groundwater Storage Changes in China from Satellite Gravity: An Overview. *REMOTE SENSING*, 2018, 10(5), 674.
- 47) Horvat, B; Rubinic, J. Evaluating the Applicability of Thermal Infrared Remote Sensing in Estimating Water Potential of the Karst Aquifer: A Case Study in North Adriatic, Croatia. *REMOTE SENSING*, 2021, 13(18), 3737.
- 48) Andres, L; Boateng, K; Borja-Vega, C; Thomas, E. A Review of In-Situ and Remote Sensing Technologies to Monitor Water and Sanitation Interventions. *WATER*, 2018, 10(6), 756.
- 49) van den Homberg, M; Crince, A; Wilbrink, J; Kersbergen, D; Gumbi, G; Tembo, S; Lemmens, R. Combining UAV Imagery, Volunteered Geographic Information, and Field Survey Data to Improve Characterization of Rural Water Points in Malawi. *ISPRS INTERNATIONAL JOURNAL OF GEO-INFORMATION*, 2020, 9(10), 592.
- 50) Jean-Claude, K. et al; Multispectral Optical Remote Sensing for Water-Leak Detection, *SENSORS*, 2022, 22(3), 1057.
- 51) Chen, J., et al; Augmenting a deep-learning algorithm with canal inspection knowledge for reliable water leak detection from

- multispectral satellite images, *ADVANCED ENGINEERING INFORMATICS*, 2020, 46, 101161.
- 52) Arsenio, AM; Dheenathayalan, P; Hanssen, R; Vreeburg, J; Rietveld, L. Pipe failure predictions in drinking water systems using satellite observations. *STRUCTURE AND INFRASTRUCTURE ENGINEERING*, 2015, 11(8), 1102-1111.
- 53) Wols, BA; Vogelaar, A; Moerman, A; Raterman, B. Effects of weather conditions on drinking water distribution pipe failures in the Netherlands. *WATER SUPPLY*, 2019, 19(2), 404-416.
- 54) Bach, PM; Kodikara, JK. Reliability of Infrared Thermography in Detecting Leaks in Buried Water Reticulation Pipes. *IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN APPLIED EARTH OBSERVATIONS AND REMOTE SENSING*, 2017, 10(9), 4210-4224.
- 55) Aljurbua, A; Sarabandi, K. Detection and Localization of Pipeline Leaks Using 3-D Bistatic Subsurface Imaging Radars, *IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING*, 2022, 60, 5220211.
- 56) Kratt, CB; Woo, DK; Johnson, KN; Haagsma, M; Kumar, P; Selker, J; Tyler, S. Field trials to detect drainage pipe networks using thermal and RGB data from unmanned aircraft. *AGRICULTURAL WATER MANAGEMENT*, 2020, 229, 105895.
- 57) Ghozzi, R; Lahouar, S; Souani, C. GPR Data Analysis for Accurate Estimation of Underground Utilities Diameter. *RUSSIAN JOURNAL OF NONDESTRUCTIVE TESTING*, 2022, 58(3), 195-204.
- 58) Santos, VRN; Bortolozzo, CA; Porsani, JL. Joint Inversion of Apparent Conductivity and Magnetic Susceptibility to Characterize Buried Targets. *IEEE GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING LETTERS*, 2017, 14(6), 846-850.
- 59) Luo, TXH; Lai, WWL. Subsurface Diagnosis With Time-Lapse GPR Slices and Change Detection Algorithms. *IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN APPLIED EARTH OBSERVATIONS AND REMOTE SENSING*, 2020, 13, 935-940.
- 60) Park, B., et al; Underground Object Classification for Urban Roads Using Instantaneous Phase Analysis of Ground-Penetrating Radar (GPR) Data, *REMOTE SENSING*, 2018, 10(9), 1417.
- 61) Loyer, J; Lepreux, JL; Genain, F. Inspection and diagnosis of water towers with images taken from drones (UAV). *HOUILLE BLANCHE-REVUE INTERNATIONALE DE L'EAU*, 2016, 2, 30-37.
- 62) Castro, CC; Gomez, JAD; Martin, JD; Sanchez, BAH; Arango, JLC; Tuya, FAC; Diaz-Varela, R. An UAV and Satellite Multispectral Data Approach to Monitor Water Quality in Small Reservoirs. *REMOTE SENSING*, 2020, 12(9), 1514.
- 63) Hout, R; Maleval, V; Mahe, G; Rouvellac, E; Crouzevialle, R; Cerbelaud, F. UAV and LiDAR Data in the Service of Bank Gully Erosion Measurement in Rambla de Algeciras Lakeshore. *WATER*, 2020, 12(10), 2748.
- 64) Messinger, M; Silman, M. Unmanned aerial vehicles for the assessment and monitoring of environmental contamination: An example

from coal ash spills. ENVIRONMENTAL POLLUTION, 2016, 218, 889-894.

- 65) 福島洋. StaMPS パッケージを用いた PS 干渉 SAR 解析. 測地学会誌, 2011, 57(2), 41-48.