UNIVERSITE DE STRASBOURG

ECOLE DOCTORALE MATHEMATIQUES SCIENCES DE L'INFORMATION ET DE L'INGENIEUR

RESUME DE LA THESE DE DOCTORAT

Discipline : Signal, image, automatique, robotique et télédétection

Spécialité (facultative) : Télédétection

Présentée par : ZHAO Changsen
(*Nom Prénom du candidat)*

Titre : Prédire les sécheresses urbaines dans le contexte du changement climatique

Unité de Recherche : UMR 7357, Laboratoire des sciences de l'ingénieur, de l'informatique et de l'imagerie (ICube)

Directeur de Thèse : NERRY Françoise, Directeur de Recherches, CNRS

Co-Directeur de Thèse : LI Zhao-Liang, Directeur de Recherches, CNRS

Localisation : ICube UMR 7357, CNRS, UdS, 300 bd Sébastien Brant, CS 10413

F-67412 Illkirch Cedex, France

Thèse confidentielle : ☒ NON ☐ OUI

La sécheresse urbaine menace le bien-être des êtres humains et la durabilité du développement socio-économique des villes. Elle peut être estimée par la quantité d'eau douce disponible dans un bassin hydrographique et la quantité de la consommation d'eau dans une ville. Pour réduire les risques induits par la sécheresse urbaine, il est urgent d'étudier le risque futur de la disponibilité de l'eau douce dans le bassin et la consommation d'eau urbaine à l'échelle du bassin et de la ville. En évaluant la sécheresse urbaine dans les recherches précédentes, beaucoup de chercheurs ont pris en compte les précipitations, l'humidité du sol, l'évapotranspiration etc. (Hobbins et al., 2016 ; Kim et al., 2019 ; Wu et al., 2021) comme base pour calculer la sécheresse urbaine. Cependant moins de considération est mise sur les études de processus de concentration de ruissellement (ou le débit) dans un bassin hydrographique. Pourtant, ce débit est très important pour estimer avec précision le TWSC (changement de stockage d'eau terrestre) (Lv et al., 2019). En outre, l'absence de longues séries de surveillance de l'eau douce disponible dans le bassin (débit et stockage des eaux souterraines) empêche de prévoir avec précision l'eau douce disponible à l'avenir. Par conséquent, il est nécessaire et urgent de produire des données sur des longues séries sur l'eau douce disponible dans le bassin sur la base de GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment de la NASA) et de prédire les futures sécheresses urbaines avec la consommation et la disponibilité de l'eau douce.

Cette thèse est consacrée au développement d'un cadre pour l'évaluation et la prédiction de la sécheresse urbaine en 2030 et 2050. Trois objectifs ont été définis : (1) Estimation de l'eau douce de surface disponible ; (2) Estimation de l'eau douce souterraine disponible ; (3) Calcul de la consommation d'eau et la prédiction de la sécheresse urbaine en 2030 et 2050. L'étude a été menée en prenant comme zone d'étude le Bassin du Fleuve Jaune, en Chine, avec une superficie de 752 443 km2 (Fu et al., 2004), en prenant comme exemples les grandes villes de population de plus de 5 millions d'habitants, comme Jinan, Zhengzhou, Xi'an. Les études comprennent l'estimation et la prédiction de la quantité d'eau douce disponible à l'échelle du bassin en développant un ensemble de nouvelles méthodes, ainsi que le calcul et la prédiction de la quantité d'eau consommée dans les zones urbaines.

Cette thèse est organisée en six chapitres :

Le chapitre 1 donne une brève introduction sur les contextes de la recherche et les objectifs de cette thèse. La sécheresse urbaine menace le bien-être des êtres humains et la durabilité du développement socio-économique des villes. Pourtant moins d’effort est mis sur le processus de concentration de ruissellement (ou le débit) dans les études précédentes. Il est urgent d'estimer la sécheresse urbaine basée sur des méthodologies de récupération de flux et d'eau souterraine, et de prédire les sécheresses urbaines futures.

Le chapitre 2 décrit les données et la zone d'étude, y compris la collecte de données, les caractéristiques de la zone d'étude (utilisation des sols, rivières, eaux souterraines, végétation, population, économie et société). Les données GRACE et GLDAS (Global Land Data Assimilation System) ont été utilisées pour l'estimation des eaux souterraines ; les données Landsat TM, les données UAV ainsi que les données hydrologiques ont été collectées pour l’obtention et la vérification du débit des cours d'eau ; les données MODIS (moderate-resolution imaging spectroradiometer) ont été utilisées pour calculer l'évapotranspiration des plantes dans la consommation d'eau et les données GDP (Gross Domestic Product) ont été collectées pour calculer la consommation d'eau des particuliers et des industries.

Le chapitre 3 vise à répondre au premier objectif. Deux nouvelles méthodes d'estimation de l'eau douce de surface disponible ont été conçues. L'eau douce de surface comprend le débit dynamique des rivières et l'eau stockée dans les lacs et les réservoirs. Le changement de cette dernière eau peut être détectée en utilisant l'imagerie des satellites de gravité (par exemple, GRACE), mais le débit doit être modélisé en utilisant un modèle hydrologique ou être obtenu en développant de nouvelles méthodes. Les difficultés de collecte des données d'écoulement au sol ont entraîné de grandes incertitudes dans la modélisation hydrologique. Pour remédier à ce problème, deux méthodes d'extraction du débit à l'aide d'images satellites ont été développées. La première a été nommée VHR-AMHG (Virtual Hydraulic Radius at-many-stations hydraulic geometry), et la seconde a été appelé méthode transcaled spatial C/M. La première méthode a une plus grande précision en saison sèche, mais la seconde est plus précise en saison humide. La première utilise uniquement la largeur de l'eau de la rivière alors que la seconde se base sur la réflectance du sol et de l'eau pour récupérer le débit. Les résultats ont montré que l'erreur relative calculée à partir de VHR-AMHG était de 16,80 %. La comparaison de l'application en saison sèche et en saison humide suggère que la méthode VHR-AMHG est plus précise en saison sèche qu'en saison humide. L'erreur relative de la méthode C/M spatiale transcalée est de 19,00 % pour l'ensemble de l'année, de 14,56 % en saison des crues et de 20,88 % en saison sans crue, ce qui suggère que la performance de la méthode transcaled spatial C/M est plus précise en saison des crues.

Le chapitre 4 répond au deuxième objectif. Un nouveau cadre a été conçu pour l'estimation de l'eau douce souterraine disponible. En outre, la série de données de GRACE a été étendue des deux dernières décennies à plus de sept décennies à partir des années 1950. Dans le même temps, les facteurs environnementaux entraînant la variation des eaux souterraines en association avec la méthode VIP ont été utilisés. À l'échelle de la zone d'étude - le bassin du fleuve Jaune - quatre facteurs, la température de l'air, les précipitations, l'évapotranspiration et la transpiration, sont responsables de la variation des eaux souterraines. Ensuite, la méthode d'intelligence artificielle-ANN (Artificial Neural Network method) a été entraînée et utilisée pour prédire la variation des eaux souterraines dans les zones et les périodes sans données (1948-2002). En moyenne, la distribution spatiale de la précision de la prédiction dans l'ensemble de la zone d'étude suggère que la précision de la zone ouest (RMSE=1,0-4,0 cm) est beaucoup plus élevée que celle de la zone est (RMSE=5,8-15,2 cm). La vérification aléatoire (comparaison de la valeur de prédiction avec l'observation de GRACE à un pixel sélectionné au hasard) montre que le modèle ANN a la plus grande précision dans les zones du bief supérieur avec une RMSE de 3,5 cm, tandis que dans le bief inférieur il a une précision plus faible avec une RMSE de 11,5 cm.

Le chapitre 5 concerne le troisième objectif de cette thèse dans lequel la consommation d'eau des ménages, de l'industrie et de l'écosystème a été calculée en utilisant les trois modèles nouvellement développés. Sur cette base, la situation de sécheresse des trois villes représentatives a été calculée. En outre, la sécheresse en 2030 et 2050 a également été prédite sur la base des scénarios CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5). Pour la consommation d'eau des ménages, les données de population globale LandScan ont été utilisées pour analyser le changement dans les villes représentatives de Xi'an, Zhengzhou, et Jinan, et en utilisant les données statistiques locales pour les vérifier. La comparaison des trois villes montre que Xi'an a la consommation d'eau domestique la plus élevée (0,176 milliard de m3 en moyenne) tandis que Ji'nan a la plus faible (0,173 milliard de m3 en moyenne). En ce qui concerne la consommation d'eau industrielle, le PIB (produit intérieur brut) des trois villes a augmenté de 2002 à 2017, mais

la consommation d'eau par PIB a progressivement diminué de 0,010-0,018 m3/RMB (ou yuan chinois) à 0,001-0,004 m3/RMB au cours de la même période, ce qui entraîne une fluctuation de la consommation d'eau industrielle (1,70 milliard de m3 en moyenne). Pour la consommation d'eau de l'écosystème, l'ET (évapotranspiration) dérivée de MODIS (Amazirh et al., 2017) a été utilisée pour rectifier l'ET modélisée par GLDAS afin que cette dernière puisse représenter l'ensemble de la zone d'étude. Les résultats montrent que Xi'an a la plus faible consommation d'eau pour l'écosystème (~1300 mm) mais que Ji'nan a la valeur la plus élevée (~1400 mm). La raison en est que, de l'amont à l'aval, la baisse de l'altitude entraîne une température plus élevée et, par conséquent, une ET beaucoup plus importante. De manière générale, la sévérité de la sécheresse en 2030 pour les trois villes est beaucoup plus élevée qu'en 2050, parmi lesquelles, la sécheresse à Xi'an en 2030 est la plus sévère dans les trois villes représentatives, car la population et la surface végétale ont augmenté, mais l'approvisionnement en eau est beaucoup plus faible en 2030, en particulier l'approvisionnement en eau douce de surface disponible.

Le chapitre six résume les conclusions et les perspectives. On peut conclure que la précision de l'estimation de l'eau douce de surface a été grandement améliorée par le couplage de la méthode VHR-AMHG et de la méthode transcaled spatial C/M récemment développées ; la première a une plus grande précision en saison sèche tandis que la seconde a une plus grande précision en saison des crues. L'eau douce souterraine disponible peut être estimée grâce au stockage total de l'eau (TWS) surveillé par GRACE : après avoir trouvé les facteurs de variation du TWS et utilisé une méthode intelligente pour interpoler et prédire la valeur du TWS dans les zones et les périodes dépourvues de données, les données GRACE ont été étendues de 2002 à aujourd'hui à 1948 à aujourd'hui ; cela facilite grandement les études sur la gestion durable des ressources en eau, et peut également fournir un soutien scientifique à l'élaboration des politiques dans le cadre de la prise en compte du changement climatique. La sévérité de la sécheresse en 2030 pour les trois villes est beaucoup plus élevée qu'en 2050 et, par conséquent, des techniques d'économie d'eau sont nécessaires de toute urgence. Pour les travaux futurs, davantage de facteurs environnementaux devraient être pris en compte lors de l'extension des séries de données GRACE afin d'améliorer la précision des prédictions. De plus, les incertitudes de l'ensemble de données CMIP5 ont sans aucun doute entraîné des incertitudes dans les résultats de ce projet et une analyse approfondie de l'ensemble de données CMIP5 devrait être menée à l'avenir afin de réduire les incertitudes dans les résultats actuels.

References

Amazirh, A., Er-Raki, S., Chehbouni, A., Rivalland, V., Diarra, A., Khabba, S., ... & Merlin, O. (2017). Modified Penman–Monteith equation for monitoring evapotranspiration of wheat crop: Relationship between the surface resistance and remotely sensed stress index. Biosystems Engineering, 164, 68-84.

Fu, G., Chen, S., Liu, C., & Shepard, D. (2004). Hydro-climatic trends of the Yellow River basin for the last 50 years. Climatic Change, 65(1-2), 149-178.

Hobbins, M.T., Wood, A., McEvoy, D.J., Huntington, J.L., Morton, C., Anderson, M., Hain, C. (2016). The evaporative demand drought index. Part I: linking drought evolution to variations in evaporative demand. J. Hydrometeorol. 17 (6), 1745–1761.

Kim, D., Lee, W., Kim, S.T., Chun, J.A. (2019). Historical drought assessment over the contiguous united states using the generalized complementary principle of evapotranspiration. Water Resour. Res. 55 (7), 6244–6267.

Lv, M., Ma, Z., Li, M., & Zheng, Z. (2019). Quantitative Analysis of Terrestrial Water Storage Changes Under the Grain for Green Program in the Yellow River Basin. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 124(3), 1336-1351.Wu, R. , Y Liu, & Xing, X. (2021). Evaluation of evapotranspiration deficit index for agricultural drought monitoring in north china. Journal of Hydrology, 126057.

TRAVAUX PUBLIES PENDANT LA THESE

Zhao, C. S., Pan, T. L., Xia, J., Yang, S. T., Zhao, J., Gan, X. J., & Ding, S. Y. (2019). Streamflow calculation for medium-to-small rivers in data scarce inland areas. *Science of The Total Environment*, 693, 133571.

Zhao, C.S., Yang, Y., Yang, S.T., Xiang, H., Wang, F., Chen, X., Zhang, H.M. and Yu, Q. (2019). Impact of spatial variations in water quality and hydrological factors on the food-web structure in urban aquatic environments. *Water Research*. 153: 121-133.

Zhao, C., Pan, T., Dou, T., Liu, J., Liu, C., Ge, Y., Zhang, Y., Yu, X., Mitrovic, S. and Lim, R., 2019. Making global river ecosystem health assessments objective, quantitative and comparable. *Science of The Total Environment*. 667: 500-510.

Zhao, C.S., Yang, S.T., Sun, Y., Zhang, H.T., Sun, C.L., Xu, T.R., Lim, R.P. and Mitrovic, S.M. (2018). Estimating river accommodation capacity for organic pollutants in data-scarce areas. *Journal of Hydrology*. 564: 442-451.

Yang, S., Guan, Y., **Zhao, C.***, Zhang, C., Bai, J., & Chen, K. (2019). Determining the influence of catchment area on intensity of gully erosion using high-resolution aerial imagery: A 40-year case study from the Loess Plateau, northern China. *Geoderma*, 347, 90-102.

Zhao, C., Ming, A., Yesou, H., Nerry, F., Li, Z. (2021). Combining Landsat TM and UAV imagery to estimate the river discharge of ungauged rivers. IN PREPARATION.