J. Lake Sci.(湖泊科学),2021,**33**(3):797-805
DOI 10.18307/2021.0315
© 2021 by *Journal of Lake Sciences*

1990－2019 年江苏片区入太湖水量变化及原因分析*

胥瑞晨[1,2],逄　勇[1,2**],胡祉冰[1,2]
(1:河海大学环境学院,南京 210098)
(2:河海大学浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室,南京 210098)

摘　要:为了对江苏片区主要入太湖水量的原因进行定量化分析研究,基于 1990－2019 年的气象数据、遥感数据以及沿江引水量数据,借助 Mann-Kendall 趋势检验与突变检验法、Envi5.3 以及 Pearson 系数法分别对近 30 年入湖水量、建筑用地、降雨量和蒸发量与引江水量进行了突变检验,并以入湖水量为因变量,对各因素间的相关性和贡献度做了量化研究.结果表明,研究区域的入湖水量近 30 年来上升趋势达到了 95%,城市化率、气象条件和沿江引水量都是导致其变化的主要原因,其中人为干扰(城市化率和沿江引水量)与自然影响(气象条件)的贡献度各占 50%.未来建议强化海绵城市的建设,合理科学地对沿江水资源进行调度使用,以降低城镇化率上升与外部引水增加带来的影响.
关键词:太湖;江苏片区;入湖水量;突变检验;相关性分析

Analysis on the water quantity changes from Jiangsu section entering Lake Taihu from 1990 to 2019*

Xu Ruichen[1,2], Pang Yong[1,2**] & Hu Zhibing[1,2]
(1: *College of Environment, Hohai University, Nanjing* 210098, *P.R.China*)
(2: *Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lakes, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing* 210098, *P.R.China*)

Abstract: In order to carry out a quantitative analysis and research on the main reasons for the amount of water entering Lake Taihu in Jiangsu, we conducted mutation tests on the amount of water entering the lake, construction land, rainfall and evaporation, and the amount of water diversion from the river in the past 30 years, using Mann-Kendall trend test and mutation test method, Envi5.3 and Pearson coefficient method, based on the meteorological data, remote sensing data, and water diversion data along the river from 1990 to 2019. Furthermore, taking the amount of water entering the lake as the dependent variable, we quantitatively evaluate the correlation and contribution of each factor. The results show that the amount of water entering the lake in the study area has risen to 95% in the past 30 years. The urbanization rate, meteorological conditions, and the amount of water along the river are the main reasons for its changes. Among them, human interference (urbanization rate and amount of water along the river) and natural influences (weather conditions) each account for 50%. In the future, it is recommended to strengthen the construction of sponge cities, and rationally and scientifically dispatch and use water resources along the river to reduce the impact of the increase in urbanization and external water diversion.
Keywords: Lake Taihu; Jiangsu area; amount of water entering; mutation test; correlation analysis

流域又称为集水区,是水量归属地的重要评判依据,通常认定当地表水和地下水的集水区重合时,称其为闭合流域,否则称为不闭合流域[1].鉴于太湖流域地下水流域仍未十分明确[2-3],很多学者将太湖地表水流域(36900 km^2)科学地分为 7 个水利分区(湖西区、武澄锡虞区、阳澄淀泖区、浙西区、杭嘉湖区、浦西区和浦东区)和一个太湖汇水区(2338 km^2)[4-5],其中江苏片区的湖西区和武澄锡虞区为太湖主要的入湖分区,

* 2020-08-20 收稿;2020-09-12 收修改稿.
国家自然科学基金项目(51879070)和国家水体污染控制与治理科技重大专项(2018ZX07208-005)联合资助.
** 通信作者;E-mail:ypang@hhu.edu.cn.

近 30 年来这两个片区的入湖水量约占流域总入湖水量的 60%~80%[6],具有典型性和代表性. 而阳澄淀柳区虽然也属于江苏片区,但多年平均入湖水量不足全流域入湖水量的 2%,因此本研究仅将湖西区和武澄锡虞区作为本文的研究范围. 对于一个湖体来说,入湖流量来源于自然降雨径流和外部引水,主要影响原因可初步确定为降雨量和蒸发量、土地径流系数以及外部引调水 3 部分[7]. 陶雨薇等对太湖流域湖西区的降雨量进行了长序列突变分析,发现湖西区近年来降雨量有明显的上升趋势[8],并且在集水区周边更加容易发生极端暴雨事件;同时李伶杰等对流域土地利用类型进行了近 25 年的分析,结果表明 2010 年不透水区域的面积相对于 1985 年增加了 150%,这将间接导致入湖径流系数的增大,进而导致入湖水量的增加[9];关于江苏片区的引水,主要来源于"引江济太"工程与湖西区沿江泵站的抽水站调度,胥瑞晨等对流域近年来的引水量做了深入分析,发现沿江引水对入湖水量也起到了一定的叠加效应,提升了水体交换速度[10],使得近年来太湖水体交换周期缩短至 170 d 左右. 总体而言,以往的研究在入湖水量成因的定性研究方面取得了较大进展,但在定量化方面仍有一定不足[11].

本研究通过中国气象数据网(http://data.cma.cn/)获取了太湖流域 1990－2019 年共计 30 年溧阳站(58345)和常州站(58343)两个气象站点的逐日资料;通过毛新伟等[12]及水利部太湖流域管理局(http://www.tba.gov.cn/)公开的数据,获取了沿江主要口门 1990－2019 年的逐年引水量资料以及湖西区和武澄锡虞区的入湖水量资料;通过地理空间数据云(http://www.gscloud.cn/)下载了 1990－2019 年太湖湖西区和武澄锡虞区精度为 30 m 的逐年遥感影像资料,并利用 Envi5.3 对土地利用类型进行计算统计. 借助 Mann-Kendall(M-K)突变法寻找 3 个主要原因近 30 年的突变年份,并根据实际情况做了相关讨论分析. 最后以 1990－2019 年城镇化率、降雨量和蒸发量以及外部引水量为自变量,入湖水量为因变量,采用 Pearson 法对主要因素做相关性及贡献度分析,讨论其对江苏片区入太湖水量的具体影响.

1 研究区域与方法

1.1 研究区域

7 大水利分区均为太湖流域的子流域,具有相对独立的汇水特性,江苏片区中主要的入湖区域包括湖西区和武澄锡虞区(31°5′10″~32°22′15″N, 119°0′0″~120°53′20″E),其主要由江苏省镇江市、常州市、无锡市和苏州市所管辖(图 1),总面积约为 11697 km^2,同时该区域近年来城镇化的快速发展与沿江引水量的增加也备受关注,具有深入研究的必要性和典型性. 地处长江下游流域区,气候温润多雨,根据中国气象数据网提供的数据,计算得到近 30 年来年均降雨量为 1195 mm,蒸发量为 1091 mm. 丘陵山区的地带性土壤相应为亚热带的黄棕壤与中亚热带的红壤,太湖平原河网湖群的低地区以沼泽土为主,耕作土壤区则以水稻土为主[13],2017 年的建设用地开发程度是 1985 年的近 3 倍,区域土地利用类型及占比发生了重大变化[14]. 根据水利部太湖流域管理局公开的数据资料可知,沿江主要设有 14 个抽水泵站,年均向流域引调水 37 亿 m^3,区域水量最终通过望虞河、太滆运河、陈东港等 50 多条入湖河道汇入太湖,近年来研究区域年均入湖水量约为 64 亿 m^3. 同时,本研究将其余河网闸站设为一个整体,在后期研究中将不会对研究结果产生任何影响,因此在此不做具体阐述.

1.2 研究方法

1.2.1 基于 Mann-Kendall 的趋势检验及突变检验法 Mann-Kendall 趋势检验法[15]是由 Mann H.B.和 Kendall M.G.提出的一种非参数统计方法,又叫无分布检验法,可以用于分析现象或者事物随时间的变化是自然波动还是存在着确定的变化趋势. 因此方法不需要样本有特定的分布规律而且不会受到异常值、缺失值的干扰,适用性广,可以明确趋势的显著性和突变发生时间且计算较为方便,多用于了解降雨、径流、水质、气候等的变化发展规律. 本研究中的建筑面积和流域进出水量均为遥感解译及实际监测数值,与降雨等数据监测方式一致,没有对数据增加任何人为后期处理与干扰,属于自然变化规律研究范畴,因此也可采用此方法进行研究.

Mann-Kendall 突变检验法:对时间序列 $(x_1,x_2,x_3,\cdots,x_n)$,定义:

其中,

$$S_k = \sum_{i=1}^{k}\sum_{j}^{i-1} a_{ij} \quad (k = 2,3,4,\cdots,n) \tag{1}$$

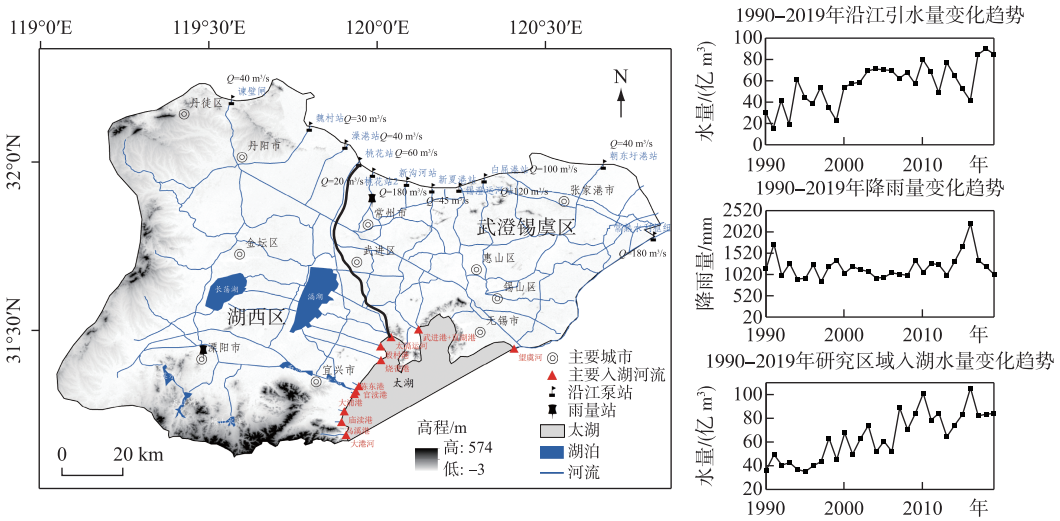


图 1 研究区域(湖西区与武澄锡虞区)

Fig.1 Study area (Huxi area and Wuchengxiyu area)

$$a_{ij} = \begin{Bmatrix} 0, x_i > x_j \\ 1, x_i \leqslant x_j \end{Bmatrix}, (1 \leqslant i \leqslant j) \tag{2}$$

均值:
$$E(S_k) = k(k-1)/4 \tag{3}$$

方差:
$$\mathrm{var}(S_k) = k(k-1)(2k+5)/72 \tag{4}$$

将 S_k 标准化:
$$UF_k = [S_k - E(S_k)]/[\sqrt{\mathrm{var}(S_k)}] \tag{5}$$

式中,UF_k服从标准正态分布,给定的 α 置信水平下,当 $|UF_k| > U_{\alpha/2}$,说明时间序列存在显著的趋势变化. 对反序排列的时间序列 $(x_n, x_{n-1}, x_{n-2}, \cdots, x_1)$,按同样的方法,则 $UB_{k'} = -UF_k, k' = n + 1 - k$. 分析绘制的 UF_k、$UB_{k'}$ 曲线以及 U_α 曲线($U_{0.05} = \pm 1.96$),当 UF_k 或者 $UB_{k'} > 0$,表示趋势上升,当 UF_k 或者 $UB_{k'} < 0$,表示趋势下降,超过 U_α 曲线则说明上升或者下降的趋势显著. 当 UF_k、$UB_{k'}$ 曲线在 U_α 曲线之间出现交点,则交点时刻即为突变发生的时刻.

1.2.2 基于 Envi5.3 的地类遥感分析法　本研究基于 Landsat5(服役年限:1985－2013 年)、Landsat7(服役年限:2000 年至今)与 Landsat8(服役年限:2013 年至今)卫星,收集到了 1990－2019 年的逐年[16]遥感影像资料. 由于 1990－2019 年期间遥感卫星影像的不确定性、样本标记的不确定性和聚类统计计算中出现的不确定性,本研究仅对 1990、1995、2000、2005、2010、2016 和 2019 年的卫星影像进行土地监督分类处理. 为了突出人造建筑痕迹,本研究采用了 7∶5∶3波段进行研究,主要对研究区域的建筑用地、林地、农田和水体 4 种主要土地利用类型进行遥感统计,样本检验值均在 1.97 以上,可以很好地对不同地类进行区分. 具体方法流程和案例分析见图 2.

1.2.3 基于 Pearson 系数的相关性分析方法　采用 Pearson 系数法[17]计算入湖水量与建筑面积、降雨量、蒸发量、总引水量、沿江引水量和望虞河引水量间的相关性,具体公式为:

$$\begin{cases} r = \dfrac{l_{xy}}{\sqrt{l_{xx} \cdot l_{yy}}}; \; l_{xx} = \sum_{i=1}^{n} x_i^2 - \dfrac{(\sum_{i=1}^{n} x_i)^2}{n}; \; l_{yy} = \sum_{i=1}^{n} y_i^{\,2} - \dfrac{(\sum_{i=1}^{n} y_i)^2}{n} \\ l_{xy} = \sum_{i=1}^{n} x_i \cdot y_i - \dfrac{\sum_{i=1}^{n} x_i \cdot \sum_{i=1}^{n} y_i}{n} \end{cases} \tag{6}$$

式中,r 为两点位相关系数,x_i和 y_i分别为研究点位盐度年均值序列,n 为年数,l_{xx}和 l_{yy}分别为变量 x 和 y 的离

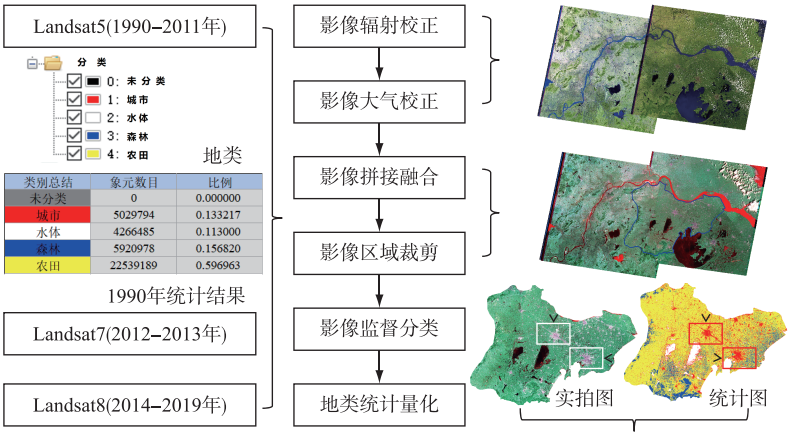


图 2 基于 Envi5.3 的研究区域土地利用类型统计分析

Fig.2 Statistical analysis of land use types in the study area based on Envi5.3

均差平方和,l_{xy} 为变量 x 和 y 的离均差积和. 相关系数的绝对值越大,相关性越强,相关系数越接近于 1 或 −1,相关度越强,相关系数越接近于 0,相关度越弱. 根据经验可将相关程度分为以下几种情况:当 $0.8 \leqslant |r|<1$ 时,视为极强相关;$0.6 \leqslant |r|<0.8$ 时,视为强相关;$0.4 \leqslant |r|<0.6$ 时,视为中等程度相关;$0.2 \leqslant |r|<0.4$ 时,视为弱相关;$|r|<0.2$ 时,说明变量之间的相关程度极弱,或视为不相关.

2 结果与讨论

2.1 入湖水量变化突变分析

2000 年之前,研究区域入湖水量平均在 45×10^8 m^3 左右,之后入湖水量便呈显著的上升趋势,整体数据拟合的 R^2 达到了 0.7 以上,说明上升幅度较为稳定(图 3),同时近年来太湖内部的水位也有着类似的变化趋势[18],初步判断这种现象的产生与区域城镇化率的变化、降雨量和蒸发量的变化和外部沿江引水的变化 3 方面有关. 结合 Mann-Kendall 突变检验计算得到水量突变点出现在 2003 年左右,之后突变趋势仍有一定的上涨,但幅度较之前有所降低,这与 2000 年以后太湖流域的快速发展及下游需水量的增加有一定的联系[19-20],其中东太湖主要饮用水源地[21]取用水量扩增到目前的 22.63×10^8 m^3/a,这些水资源的刚性需求势必导致流域外部沿江引水总量的增加,进而增加了区域的入湖水量,以每隔 10 年的数据为平均计算,发现近 30 年来总体入湖水量增加幅度达到了 95%. 为了进一步确定每类影响原因的具体突变年份,本文接下来对土地利用类型、降雨量和蒸发量与引水量做了进一步的 Mann-Kendall 突变研究.

2.2 研究区域外部条件变化及突变分析

2.2.1 研究区域土地利用类型变化及突变分析 1990−2019 年研究区域土地利用类型的分析结果(图 4)表明,近 30 年来主要变化的土地结构为建筑用地和农田,其中建筑用地相对 1990 年增加了近 2000 km^2,是原有面积的 1.33 倍,农田面积减少了 1500 km^2,占原有面积的 21%,水体和林地总体变化不大,主要变化出现在 2000 年前后,这与当时退圩还湖和森林砍伐等有一定的关系[22]. 对建筑用地面积进行 Mann-Kendall 突变计算,发现其突变点也在 2003 年前后,与入湖水量的突变时间点有着高度一致性,可初步确定近年来建筑用地面积的大幅度增加会对入湖水量增加产生影响[23]. 并且 2010 年后又有较为明显的抬升趋势,预测在未来 10 年还会出现突变现象.

2.2.2 研究区域降雨量和蒸发量变化及突变分析 基于 1990−2019 年溧阳站(58345)和常州站(58343)雨量站的逐日降雨蒸发数据,分别对降雨量和蒸发量的突变进行计算(图 5). 结果表明降雨量突变点发生在 2011−2014 年之间,2011 年之前突变现象不明显,说明流域降雨虽然有一定的上升趋势,但总体上仍较为平稳,2014 年之后的两年突变幅度较大,这是由于 2015 年和 2016 年降雨量突然暴增[24], 近 5 年来降雨量

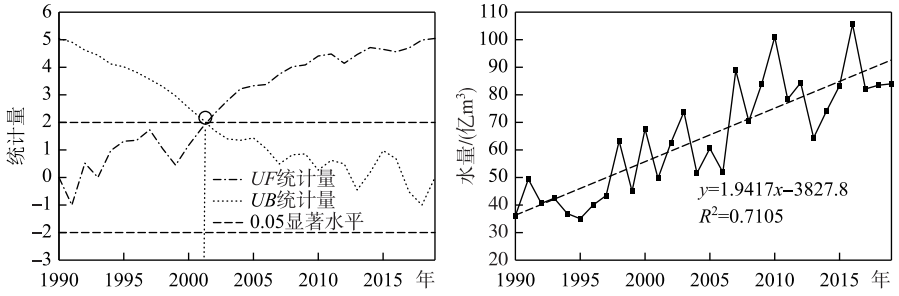


图 3 1990－2019 年研究区域入湖水量变化及突变计算:(a)研究区域入湖水量突变计算;(b)1990－2019 年研究区域逐年实测入湖水量

Fig.3 Changes in the amount of water entering the lake from 1990 to 2019 in the study area and calculation of sudden changes:(a) calculation of the sudden change in the amount of water entering the lake in the study area; (b) average annual measured water entering the lake in the study area from 1990 to 2019

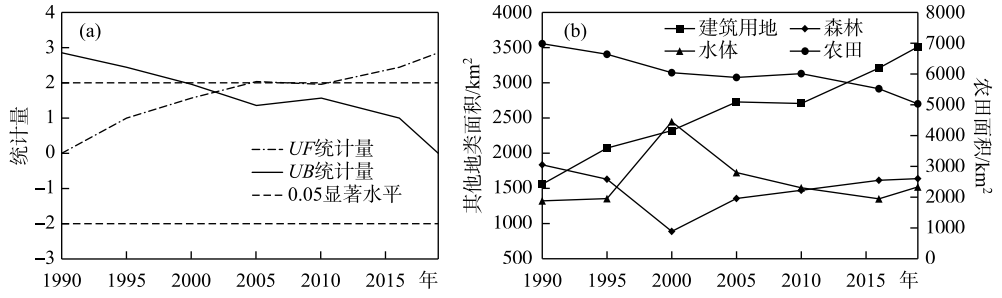


图 4 1990－2019 年研究区域 4 大地类变化及建筑用地面积突变计算:(a)研究区域土地利用面积突变计算;(b)1990－2019 年研究区域遥感解译的土地利用面积变化

Fig.4 Changes in the four major types of land in the study area from 1990 to 2019 and calculation of sudden changes in construction land area: (a) sudden change calculation of the land use area of the study area; (b) land use area interpreted by remote sensing in the study area from 1990 to 2019

变化浮动较之前更加明显,可能与全球性气候变化有关,但目前总体仍处于较为稳定的状态,近 30 年来的增长幅度仅为 15%. 蒸发量的突变点出现在 2003 年左右,与流域入湖水量的突变点具有一致性,并且突变现象明显,在突变点之后保持了很长时间的大幅度降低,总体变化幅度达到了 34%,这个现象与这两个测点所在区域土地利用类型的变化有着一定的联系[25],具体原因仍有待进一步研究. 降雨量的增加与蒸发量的减少共同导致了总体变化达到了 49%左右.

2.2.3 研究区域引水量变化及突变分析 对研究区域总的沿江引水量做了 Mann-Kendall 突变检验(图 6a),发现沿江引水量也与入湖水量具有极相似的突变年份,这与 2002 年望虞河“引江济太”工程的正式运行有一定关系,同时突变幅度一直延续到 2010 年后才趋于稳定[26]. 从图 6b 和 c 可知区域沿江引水量自 1990－2010 年呈现显著线性上升趋势,望虞河引水量总体趋势与望虞河以西沿江引水量一致,这是由于区域引水一般是在降雨量小或者水资源供应不足的阶段,但在 2010 年左右望虞河引水量开始呈现二元非线性降低趋势,此时望虞河以西沿江引水量仍然保持着稳步上升趋势,这说明了望虞河以西沿江引水工程起到了越来越重要的作用[27],同样也可以解释 2010 年后变化趋缓的现象. 近 30 年来区域外部引水量总体上升比例达到了 84%,其中望虞河引水增幅也达到了 81%. 虽然中间有京杭大运河的阻隔,但仍然不能完全避免外来水量进入太湖,基于河海大学水文资料可知 2017 年京杭大运河的逆流时间为 134 d,较 2007 年的 10 d 多了 4 个月左右,此时外部沿江引水无法顺流而下,将大面积跨过大运河进入宜兴腹地,进而导致入湖水量增加的现象产生[28].

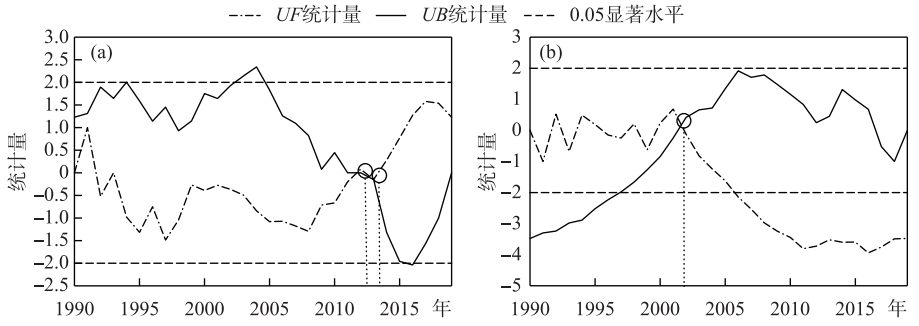


图 5 1990－2019 年研究区域降雨量(a)与蒸发量(b)突变计算

Fig.5 Calculation of sudden changes in rainfall (a) and evaporation (b) in the study area from 1990 to 2019

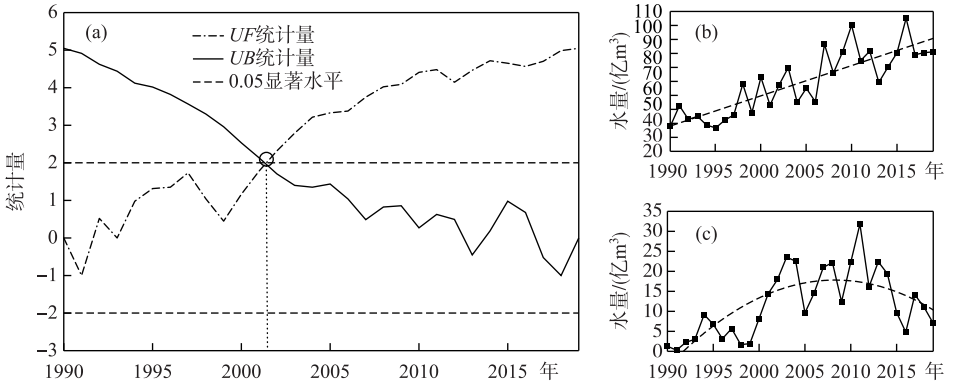
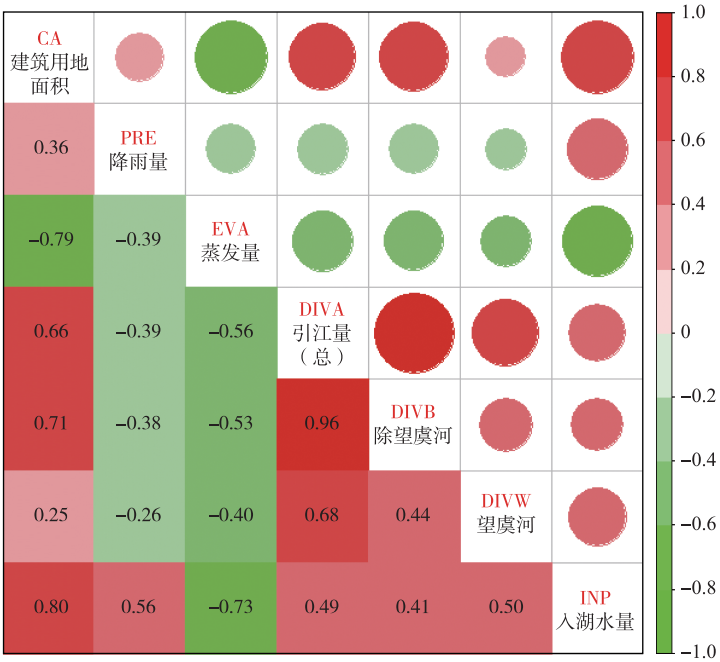


图 6 1990－2019 年研究区域引水量突变计算:(a)研究区域沿江引水量突变计算;(b)1990－2019 年总沿江引水量逐年变化;(c)1990－2019 年望虞河引水量逐年变化

Fig.6 Calculation of sudden changes in water diversion in the study area from 1990 to 2019: (a) calculation of the sudden change of water diversion along the river in the study area; (b) year-by-year change of the total water diversion along the river from 1990 to 2019; (c) year-by-year change of the Wangyu River water diversion from 1990 to 2019

2.3 外部条件对入湖水量的相关性及贡献度分析

根据 2.2 节的分析结果可知,研究区域的土地利用类型变化、降雨量和蒸发量变化与外部引水量都是导致近 30 年入湖水量增加的原因. 为了进一步确定每个因素对入湖水量的贡献度,基于 Pearson 系数法对建筑用地面积、降雨量、蒸发量、外部引水量共计 4 个因素进行了相关性和改进型敏感性研究,其中外部引水量细分了总量、望虞河以西口门引水量以及望虞河引水量. 分析结果表明,近 30 年来,与入湖水量相关性强弱排序分别为建筑用地面积(l_{xy}=0.8,正极强相关)>蒸发量(l_{xy}=−0.73,负强相关)>降雨量(l_{xy}=0.56,正中等相关)>外部引水量(l_{xy}=0.49,正中等相关),其中望虞河引江量对入湖水量的影响要大于沿江其他口门的影响[29]. 结合权重公式计算得到了不同外部条件对入湖水量的具体贡献度(图 7),发现 2017－2019 年的入湖水量增加其实是多方面综合条件变化所导致的结果和现象,但其中人为因素导致的贡献度高达 50%,与自然所贡献的比重一样,这间接说明了太湖流域江苏片区的人为干扰已经到达了一个临界点,在此呼吁未来的土地利用规划应该更加深入地对自然环境进行考虑,增加海绵城市和水敏性城市的打造力度,减少硬质化建筑的比重[30],同时科学合理地对外部水资源进行引调,降低对太湖流域的非自然性影响[31].



$$M = \sum_{i=1}^{4} |l_{xy}|$$

$$C_i = \frac{|l_{xy}|}{M} = \frac{|l_{xy}|}{\sum_{i=1}^{4} |l_{xy}|}$$

式中,M 为建筑用地面积、降雨量、蒸发量与引江总量的相关度之和;i 为对应的具体因素;C_i 为不同因素对入湖水量的贡献程度.

类别	因素名称	贡献度 C_i
人为因素	建筑用地面积	31%
	引江量(总)	19%
自然因素	降雨量	22%
	蒸发量	28%

图 7 入湖水量的相关性分析及各主要因素的贡献度计算

Fig.7 Correlation analysis of water entering the lake and calculation of the contribution from each main factor

3 结论与展望

1) 近 30 年来(1990—2019 年)江苏片区入太湖水量有明显且稳定的上升趋势,总体入湖水量增加幅度达到了 95%,突变时间位于 2003 年前后.

2) 导致入湖水量变化的主要原因为土地利用类型变化、降雨量和蒸发量变化以及外部引水量变化,其中近 30 年来土地利用类型中建筑用地面积增加了 17%,突变时间在 2003 年左右;降雨量和蒸发量增加了 49%,其中降雨量增幅为 15%,突变时间在 2011—2014 年之间,蒸发量降幅为 34%,突变时间在 2003 年左右;外部引水年平均增加了 84%,其中望虞河增幅为 81%,突变时间在 2003 年前后. 3 方面因素与入湖水量的突变具有高度一致性.

3) 主要外部因素与入湖水量间的相关关系分别为建筑用地面积(l_{xy} = 0.80,正极强相关)>蒸发量(l_{xy} = −0.73,负强相关)>降雨量(l_{xy} = 0.56,正中等相关)>外部引水量(l_{xy} = 0.49,正中等相关),其中望虞河引江量对入湖水量的影响要大于沿江其他口门的影响. 未来应该强化海绵城市和水敏性城市的建设力度,同时科学适当引水,以避免给太湖带进过多的人为干扰.

致谢:特别感谢中国气象数据网、地理空间数据云与水利部太湖流域管理局公开的基础数据资料.

4 参考文献

[1] Yue J, Mu GJ, Yang FX *et al*. Discussion on conceptional issues of drainage basins. *Arid Land Geography*, 2005, **28**(6): 775-780. [岳健, 穆桂金, 杨发相等. 关于流域问题的讨论. 干旱区地理, 2005, **28**(6): 775-780.]

[2] Cheng X, Huang WL, Jiang Y *et al*. Problems about Taihu Lake Basin groundwater and countermeasures. *Water Resources Protection*, 2003, **19**(4): 1-4. [成新, 黄卫良, 江溢等. 太湖流域地下水问题与对策. 水资源保护, 2003, **19**(4): 1-4.]

[3] Xu RC, Xiang L, Cui GB *et al*. Dynamic simulation and analysis of groundwater storage in typical watershed of Taihu Basin. *Water Resources Protection*, 2016, **32**(2): 51-56. [徐如超, 向龙, 崔广柏等. 太湖地区典型小流域地下水储量

动态模拟与分析. 水资源保护, 2016, **32**(2): 51-56.]

[4] Yang F, Gao YH, Cheng G. Analysis of annual precipitation trend in Taihu Lake Basin from 1961 to 2015. *China Flood & Drought Management*, 2020, **30**(3): 51-54, 60. [杨凤, 高颖会, 陈钢. 太湖流域 1961－2015 年降水趋势分析. 中国防汛抗旱, 2020, **30**(3): 51-54, 60.]

[5] Gan YY, Wang KY, Gan SW. Analysis of the water balance in the Taihu Basin in recent years. *Journal of China Hydrology*, 2019, **39**(1): 89-92. [甘月云, 王凯燕, 甘升伟. 近年来太湖流域水量平衡分析. 水文, 2019, **39**(1): 89-92.]

[6] Wang DW, Chen H. Trend analysis of water diversion and discharge along the Yangtze River and around Taihu Lake in Taihu Lake Basin. *Water Resources Planning and Design*, 2016, (1): 54-56. [汪大为, 陈红. 太湖流域沿长江及环太湖引排水量趋势分析. 水利规划与设计, 2016, (1): 54-56.]

[7] Wu J, Hu Y, Wu J *et al*. Preliminary analysis on the change of the amount of water entering the lake in the west of the Taihu Lake Basin. *Journal of China Hydrology*, 2016, **36**(3): 44-49. [吴娟, 胡艳, 武剑等. 太湖流域湖西区入湖水量变化及原因初步分析. 水文, 2016, **36**(3): 44-49.]

[8] Tao YW, Wang YK, Wang D *et al*. Analysis of temporal and spatial distribution characteristics of heavy rain in the west region of Taihu Lake. *Hydro-Science and Engineering*, 2020, (3): 43-50. [陶雨薇, 王远坤, 王栋等. 太湖流域湖西区暴雨时空分布特性分析. 水利水运工程学报, 2020, (3): 43-50.]

[9] Li LJ, Hu QF, Wang YT *et al*. Temporal and spatial distribution characteristics of water production changes in the Taihu Lake Basin in the process of rapid urbanization. *J Lake Sci*, 2019, **31**(5): 1289-1298. DOI: 10.18307/2019.0519. [李伶杰, 胡庆芳, 王银堂等. 快速城镇化进程中太湖流域产水量变化的时空分布特征. 湖泊科学, 2019, **31**(5): 1289-1298.]

[10] Xu RC, Pang Y, Hu ZH *et al*. Research on the influence of "diversion from the River to Taihu" project on the water exchange of Taihu Lake. *China Environmental Science*, 2020, **40**(1): 375-382. [胥瑞晨, 逄勇, 胡祉冰等. "引江济太"工程对太湖水体交换的影响研究. 中国环境科学, 2020, **40**(1): 375-382.]

[11] Ji HP, Wu HY, Wu J. Analysis of changes in the amount of water entering and leaving Lake Taihu from 1986 to 2017. *J Lake Sci*, 2019, **31**(6): 1525-1533. DOI: 10.18307/2019.0612. [季海萍, 吴浩云, 吴娟. 1986－2017 年太湖出、入湖水量变化分析. 湖泊科学, 2019, **31**(6): 1525-1533.]

[12] Mao XW, Lu MF, Jia XW *et al*. Analysis of the change of water diversion pattern along the Yangtze River and its impact in the area west of Wangyu River in Taihu Lake Basin. *Water Resources Development Research*, 2010, **10**(9): 31-34. [毛新伟, 陆铭锋, 贾小网等. 太湖流域望虞河以西地区沿长江引水格局变化及其影响分析. 水利发展研究, 2010, **10**(9): 31-34.]

[13] Zhang YG, Zhang C. Current status and thinking of dynamic monitoring of soil and water loss in Taihu Lake Basin. *Subtropical Soil and Water Conservation*, 2016, **28**(4): 59-62. [张玉刚, 张辰. 太湖流域片水土流失动态监测现状与思考. 亚热带水土保持, 2016, **28**(4): 59-62.]

[14] Sun W, Chen W, Liu CG. Correlation evaluation of water sensitivity and construction land expansion in Taihu Basin. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, **28**(7): 1575-1582. [孙伟, 陈雯, 刘崇刚. 太湖流域水敏性与建设用地扩张的关联评价. 长江流域资源与环境, 2019, **28**(7): 1575-1582.]

[15] Rogora M, Somaschini L, Marchetto A *et al*. Decadal trends in water chemistry of Alpine lakes in calcareous catchments driven by climate change. *Science of the Total Environment*, 2020, **708**: 135180. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.135180.

[16] Chen J, Zhu WN, Tian YQ *et al*. Monitoring dissolved organic carbon by combining Landsat-8 and Sentinel-2 satellites: Case study in Saginaw River estuary, Lake Huron. *Science of the Total Environment*, 2020, **718**: 137374. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137374.

[17] Aquino KM, Fulcher BD, Parkes L *et al*. Identifying and removing widespread signal deflections from fMRI data: Rethinking the global signal regression problem. *NeuroImage*, 2020, **212**: 116614. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2020.116614.

[18] Yue H, Liu Y. Volume change monitoring of Lake Taihu based on Landsat, ICESat and Hydroweb. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2017, **48**(9): 77-83. [岳辉, 刘英. 基于 Landsat 及 ICESat 和 Hydroweb 的太湖容积变化监测. 水利水电技术, 2017, **48**(9): 77-83.]

[19] Tian JM, Wang YH, Ye C *et al*. Evolution of land use patterns in Taihu Lake Basin and its impact on water body's nitrogen and phosphorus load. *Journal of Nanjing Normal University: Natural Science Edition*, 2010, **43**(2): 63-69. [田甲鸣, 王延华, 叶春等. 太湖流域土地利用方式演变及其对水体氮磷负荷的影响. 南京师大学报: 自然科学版, 2020, **43**

(2): 63-69.]

[20] Ru JJ, Su WZ, Ye GB. Urban and rural construction land expansion hot area and flood risk assessment in Taihu Lake Basin. *Areal Research and Development*, 2019, **38**(3): 148-153. [汝静静, 苏伟忠, 叶高斌. 太湖流域城乡建设用地扩张热区与洪涝危险性评价. 地域研究与开发 2019, **38**(3): 148-153.]

[21] Zhu YQ, Lu SQ, Wu JQ. Pilot test study on purification effect of Jinze ecological water source lake reservoir. *Environmental Science and Technology*, 2018, **31**(3): 40-45. [朱永青, 卢士强, 吴建强. 金泽生态水源湖水库净化效果中试试验研究. 环境科技, 2018, **31**(3): 40-45.]

[22] Lv W, Yang GS, Wan RR *et al*. Comparison of ecological water consumption's components of typical land use types in Taihu Lake Basin. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2018, **38**(4): 103-108, 113. [吕文, 杨桂山, 万荣荣等. 太湖流域典型土地利用类型生态耗水分量的比较研究. 水土保持通报, 2018, **38**(4): 103-108, 113.]

[23] Ou XW, Liu C, Tao Y. Analysis on the spatio-temporal evolution of water supply service supply and demand in Taihu Lake Basin. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2020, **29**(3): 623-633. [欧维新, 刘翠, 陶宇. 太湖流域水供给服务供需时空演变分析. 长江流域资源与环境, 2020, **29**(3): 623-633.]

[24] Qing JG, Zhu LX, Sheng LS *et al*. Rain forecast simulation of the "2016 Taihu Lake Flood" year. *Jiangsu Water Resources*, 2020, (5): 1-7. [秦建国, 朱龙喜, 盛龙寿. "2016 太湖大洪水"年景的雨情预测模拟. 江苏水利, 2020, (5): 1-7.]

[25] Lv W, Yang GS, Wan RR. Impact of land use changes on spatial-temporal pattern of ecological water consumption in Taihu Lake Basin in resent 25 years. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2016, **25**(3): 445-452. [吕文, 杨桂山, 万荣荣. 太湖流域近 25 年土地利用变化对生态耗水时空格局的影响. 长江流域资源与环境, 2016, **25**(3): 445-452.]

[26] Zhou J, Ren XL, Yang JY *et al*. Impact of land use change on the temporal and spatial pattern of ecological water consumption in the Taihu Lake Basin in the past 25 years. *Science & Technology Information*, 2017, **15**(11): 142, 144. [周杰, 任小龙, 杨金艳等. 望虞河引江济太工程的水生态环境影响. 科技资讯, 2017, **15**(11): 142, 144.]

[27] Wen YH, Wang ZY, Dong JG. Preliminary study on changing condition for inflow and outflow of Taihu Lake. *Yangtze River*, 2014, **45**(1): 20-23. [闻余华, 王中雅, 董家根. 太湖入出湖水量变化情势及其原因初探. 人民长江, 2014, **45**(1): 20-23.]

[28] Zhu L, Liu MX, Ruan XH *et al*. Potential and countermeasures of water saving in Taihu Lake Basin. *Water Resources Protection*, 2007, **23**(2): 77-80. [朱亮, 刘明祥, 阮晓红等. 太湖流域节水潜力与措施. 水资源保护, 2007, **23**(2): 77-80.]

[29] Cao JP, Yao J, Peng H. Analysis of the change of water diversion pattern along the Yangtze River and its impact in the area west of Wangyu River in Taihu Lake Basin. *Express Water Resources & Hydropower Information*, 2019, **40**(5): 17-20. [曹菊萍, 姚俊, 彭欢. 太湖流域重要河湖年度分配水量模拟评估分析. 水利水电快报, 2019, **40**(5): 17-20.]

[30] Zhou ZC. Simulated evaluation and analysis of annual water distribution of important rivers and lakes in the Taihu Basin. *Environmental Engineering*, 2020, (8): 1-11. [周志才. 基于 SWMM 模型的上海市松江国际生态商务区海绵城市建设效果模拟. 环境工程, 2020, (8): 1-11.]

[31] Ling H, Wu D, Tang DY *et al*. Causes and countermeasures for the increase of total phosphorus in Lake Taihu in recent years. *Environmental Science and Technology*, 2018, **31**(6): 54-59. [凌虹, 巫丹, 谭东烜等. 近年太湖总磷升高成因及对策建议. 环境科技, 2018, **31**(6): 54-59.]