

DOI: 10.20103/j.stxb.202404180864

陈前虎, 许越. 基于“水-土耦合”视角的城市开发容量评估与诊断——以杭州 86 个水管理单元为例. 生态学报, 2025, 45(1): 434-444.

Chen Q H, Xu Y. Assessment and diagnosis of urban development capacity based on “land-water coupling”: a case study of 86 water management units in Hangzhou. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(1): 434-444.

基于“水-土耦合”视角的城市开发容量评估与诊断 ——以杭州 86 个水管理单元为例

陈前虎, 许 越*

浙江工业大学设计与建筑学院, 杭州 310023

摘要: 城市水环境问题涉及源头控制、过程监管和末端治理三个过程, 而当前的水环境保护与治理工作未能明确水问题的成因及背后的责任边界。对此, 基于“水-土耦合”视角, 引入水质“效应值”“实测值”“目标值”概念, 构建起“三值联动”分析的城市开发容量评估与水质问题诊断系统, 并以杭州为例进行实证研究。结果表明: (1) 基于控制断面、子流域、行政边界三要素划分的水管理单元明确了属地管理部门的责任边界。(2) 82.6% 的研究单元水环境容量盈余 (效应值 < 目标值), 其余水环境容量亏损的单元主要分布在钱塘江以南片区; 67.4% 的研究单元水质达标 (目标值 > 实测值), 主要分布在杭州主城区西部和北部, 水质超标的单元集中在萧山科技城、钱江世纪城、湘湖新城等地区; 87.2% 的研究单元存在过程监管或末端治理缺位 (效应值 < 实测值) 的情况, 其中 68.0% 研究单元的末端治理到位但过程监管还存在漏洞 (目标值 > 实测值), 其余 32.0% 的研究单元在过程监管和末端治理上都有漏洞 (目标值 < 实测值)。(3) 该评估诊断系统能够实时把握土地开发容量动态与水质约束条件, 为“水-土耦合”的国土空间用途管制提供新的决策工具。

关键词: 水管理单元; 水环境质量; 开发容量; 多情景诊断; 水-土耦合

Assessment and diagnosis of urban development capacity based on “land-water coupling”: a case study of 86 water management units in Hangzhou

CHEN Qianhu, XU Yue*

School of Design and Architecture, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China

Abstract: Urban water environment problems involve three major processes: development control at the source, management and supervision in the process, and water treatment at the end-of-pipe. However, the current water environment protection and management fails to clarify the causes of water environment problems as well as differentiate the boundaries of responsibility behind these phenomena. In this regard, based on the perspective of “land-water coupling”, this study introduced the three concepts of “effect value”, “measured value”, and “target value” of water quality, and constructed a system of urban development capacity assessment and water quality problems diagnosis according to the analysis of “tri-value linkage”, and Hangzhou was taken as the example to conduct empirical analysis. The results showed that: (1) According to the three principles of watershed singularity, unity of water quality control objectives, and uniqueness of administrative subjects, the water management units, which were divided by sub-basins, water quality control sections, and administrative boundary data, effectively clarified the responsibility boundaries between the various local management departments. (2) 82.6% of the research units showed a surplus in water environment capacity (effect value < target value), which indicated that their source development control was effective; The rest of the research units, whose

基金项目: 国家自然科学基金 (52278083); 国家重大社科基金项目 (16ZDA018)

收稿日期: 2024-04-18; **网络出版日期:** 2024-09-23

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xuyuechn2020@163.com

water environmental capacity were insufficient or even seriously exceeded (effect value > target value), had some problems in their source development control, which were mainly located in the area south of Qiantang River. 67.4% of the research units had reached the water quality standard (target value > measured value), which directly indicated that their end-of-pipe water treatment was effective, and these units were mainly located in the west and north of Hangzhou; The units whose water quality exceeded the standard (target value < measured value) still need to be perfected in their end-of-pipe water treatment, which were concentrated in areas like Xiaoshan Science and Technology City, Qianjiang Century City, Xianghu New City and other areas. 87.2% of the research units had problems in process management supervision or end-of-pipe water treatment (effect value < measured value), 68.0% of which had effective end-of-pipe treatment but their process management supervision still had some problems (target value > measured value), and the remaining 32.0% of them had defects in both process management supervision and end-of-pipe water treatment (target value < measured value). (3) The assessment and diagnostic system is able to monitor the dynamics of land development capacity and water quality constraints in real time, and provides a new decision-making tool for land-water coupled spatial use control of the national territory.

Key Words: water management unit; water environment quality; development capacity; multi-scenario diagnosis; land-water coupling

大多数城市通过雨污分流、沿河截污纳管等独立的排水设施建设,实现了“污水零直排”,点源污染防治的基础性工程已经具备,水环境质量得到初步改善^[1]。然而,随着城市开发带来的径流面源污染越来越严重,以及点源污染偷漏排现象的时常发生,要达到“污染物排放总量大幅减少,生态环境质量总体改善”的国家生态环境保护战略目标^[2],还面临很大困难和挑战。城市建设乃百年大计,长期以来,一方面,对径流有重大影响的土地开发的水资源论证制度主要停留在“以水(量)定城”的狭义层面,尚未考虑到“以水(质)定城”的深层内涵,导致水环境治理往往陷入“亡羊补牢”的窘境;另一方面,由于水环境治理事权分属水利、环保、城管、住建、自然资源等多个部门,“九龙治水”造成城市水环境问题成因不明、责任边界不清,治理工作常常陷入“头痛医头、脚痛医脚”的困境。面对水环境容量,如何判断城市开发是否超载?当前水环境问题的成因与责任边界在哪?上述问题的深入探讨,是解决长期以来“水土不合”两张皮现象、进一步完善国土空间全过程与精细化治理,进而彻底解决城市水环境问题的重要前提。

目前围绕水环境约束下的国土空间开发研究主要有三种视角。其一是基于现有的水质监测数据,以缓冲区^[3-9]、流域^[10-15]、排水分区^[16]等为研究单元,探究不同土地利用和景观格局与河流水质之间的关系,多侧重于揭示国土空间开发影响河道水质的机理与机制,为源头上控制水质问题提供科学依据;其二是基于水文模型,模拟不同土地利用情况、不同气候条件背景下的流域水环境,进而统筹解析“水-陆”关系^[17-20],多是建立单一的地表水环境模型或流域非点源污染模型,分别模拟流域出口的水文要素、营养负荷及其在地表水体中的迁移转换过程等,为水污染的过程解析和趋势预测提供有效支撑;其三是从宏观的流域尺度开展水生态与水环境功能区划研究^[21-25],多根据流域或区域的自然环境和自净能力,把污染物负荷总量控制在自然环境的承载能力范围之内,为后期流域管理提供战略层次的参考。上述研究多从单要素、单维度的视角出发,缺乏对水环境治理全过程的综合研判与影响因素分析,且并未关注到现实各管理部门的责任边界,从而难以提出更为精细和精准化的国土空间治理建议。与此同时,随着国土空间治理“一张图”的全生命周期管理及城市数字化改革的大力推进,城市开发将实现可诊断和可预测^[26-27]。因此,为缝合一直以来存在的国土空间开发与水环境保护的“两张皮”现象,从“水-土耦合”视角构建城市开发容量分析框架,创新评估方法,以实现精准溯源城市水环境问题的目标,这对于国土空间治理具有重要的理论意义与实践价值。

鉴于此,本文根据流域单一性、水质管控目标统一性、行政主体唯一性三大原则划分水管理单元;围绕水环境治理的源头控制、过程监管、末端治理三大环节,引入水质效应值、实测值与目标值三个概念,探索了多源动态数据融合的城市开发容量评估诊断系统,构建出“管理单元划分—开发情景识别—水质问题溯源”的

“水-土耦合”的国土空间开发治理的新方法与新路径,实时把握土地开发容量动态与水质约束条件,以期为国
土空间治理和水环境保护提供科学方法与智慧手段。

1 研究区概况

杭州地处长江三角洲南沿和钱塘江流域,属亚热带季风气候,四季分明,雨量充沛,东部属浙北平原,地势
低平,河网湖泊密布,具有江南水乡典型特征。改革开放以来,杭州经济社会快速发展,与此同时,水生态环境
保护压力持续增大。经过近十年来的“五水共治”和“污水零直排”工程建设,杭州城市点源污染的硬件控制
基本到位,河道水质基本反映了周边土地利用状况与城市管理水平,但随着城市规模持续扩张,径流面源污染
问题日益突出。2022 年 1 月,《杭州市生态环境保护“十四五”规划》出台,提出要建设“生态智卫”数字化治
理生态协同管控平台,打造数字环保第一城。因此,以杭州为对象,契合杭州水生态环境保护需求与城市数字
化转型目标要求,具有典型性。本研究选取杭州市辖区内上城、拱墅、西湖、滨江、萧山、钱塘、余杭、临平八区
作为主要对象。

2 研究方法

2.1 数据来源与研究单元划分

2.1.1 数据来源

本研究使用的数据主要包括数字高程数据 (DEM)、控制断面考核数据、行政边界数据、土地利用数据、土
壤数据等多源数据(表 1)。原始图像数据都在 ArcGIS 上进行投影校正和边界裁剪处理。

表 1 数据来源及基本情况

Table 1 Data sources and basic information

数据名称 Data set	数据来源 Data source	数据格式 Data format	用途 Application
数字高程数据 Elevation data	资源环境科学与数据中心 (http://www.resdc.cn/)	栅格数据	划分研究单元、模拟水质效 应值
断面考核要求 Water quality requirements	杭州市生态环境局 (https://epb.hangzhou.gov.cn/) 浙江省环境厅 (http://sthjt.zj.gov.cn/)	矢量数据	划分研究单元、确定水质管 控目标
行政边界数据 Administrative boundaries data	资源环境科学与数据中心 (http://www.resdc.cn/)	矢量数据	划分研究单元
土地利用数据 Land use data	Landsat 卫星遥感解译	栅格数据	模拟水质效应值、计算源汇 指数
土壤数据 Soil data	世界土壤数据库	栅格数据	模拟水质效应值
气象数据 Meteorological data	国家地球系统科学数据中心 (http://www. geodata.cn)	栅格数据	模拟水质效应值
水质监测数据 Water quality monitoring data	蔚蓝地图 (https://www.ipe.org.cn/index. html)	矢量数据	确定水质实测值

2.1.2 研究单元划分

流域划分是水文分析工作的第一步。在水土保持、水资源保护和洪旱灾害研究等工作中所使用的大量水
文特征数据往往会以各子流域边界为基础^[28–31]。在此基础上,为进一步满足流域水环境精细化管理需求,明
确属地管理部门的责任边界,本文以各个水环境功能区内的控制断面为节点,综合考虑控制断面、子流域、行
政区因素划分水管理单元,体现了地表径流特征及行政管理需求,划分思路如下:

采用 ArcGIS 的水文分析模块,利用杭州市数字高程 (DEM) 数据提取水系,结合杭州市实际水系修正得
到 255 个子流域;按照流域单一性、水质管控目标统一性、行政主体唯一性三大原则^[21, 32],采用空间叠置分

析:筛选出所有与控制断面管控要求一致的子流域,并将选出的子流域与杭州市街道行政边界叠加,最终筛选得到符合三大原则要求且面积适中的 86 个水管理单元作为研究对象(图 1)。其中面积最大的研究单元(9.75 km^2)位于萧山区临浦镇,面积最小的研究单元(1.7 km^2)位于萧山经济技术开发区。

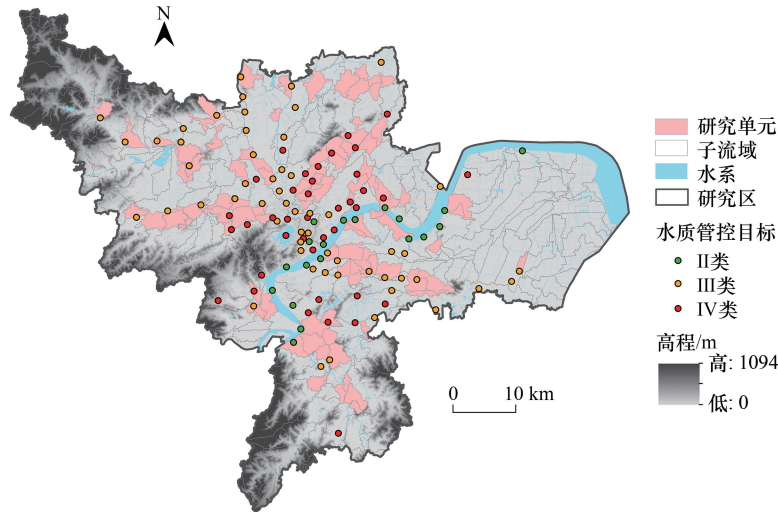


图 1 研究区及研究单元划分

Fig.1 Research region and division of research units

2.2 城市开发容量评估诊断系统

土地利用主要通过改变地表覆被影响流域的蒸散发、截留、下渗等特性,进而导致城市水文效应发生变化^[33-34]。随着城市化推进,原有的自然水循环下产生了社会侧支循环,实际的水质状态受到了人类活动、城市管理等多因素因素的影响。为此,研究将一块自然的土地经开发建成后的区域水质作为“效应值”,反映了气候、地形地势、土壤植被类型等自然地理因素和土地利用类型、土地利用规模等城市开发因素影响下的水质理论状态,不受点源污染等城市管理因素的影响,在城市开发格局确定的情况下效应值固定不变;将直接从城市河道内测得的水质作为“实测值”,反映了自然地理、土地开发、城市管理等多重因素影响下的水质实际状态,会受自然和人类经济社会活动的综合影响而产生变动。理论上,在城市水环境管理到位,即充分落实雨污分流等排水体制、杜绝偷漏排带来的一系列点源污染问题的前提下,效应值等于实测值;若属地政府还进行了积极的河道水质末端治理,则实测值小于效应值。反之,若城市管理缺位,存在雨污混排、污水偷漏排、城市路面清扫不及时等问题且末端治理没有及时跟进,则实测值大于效应值。

与此同时,为促进水资源的合理开发利用与有效保护,环保部门结合水环境现状、水环境承受能力(环境容量)、社会经济发展需求等因素,在相应水域划定了满足水资源合理开发利用和保护要求的区域,即水环境功能区,并确定了不同功能区的水质目标。基于此,本文将水环境功能区的水质要求作为“目标值”,反映了基于水环境现状、经济社会发展需求与环保要求下的水质管理目标。水质管理目标是水环境功能区划的阶段性成果,会随着水环境功能区划的反馈、修改、完善而进行调整^[35]。

综上,本研究从水(水环境治理)土(国土空间管治)耦合角度,综合考虑自然状态、土地开发、城市管理等多重环节与可持续发展的目标要求,引入效应值、实测值与目标值三个概念,梳理出不同环节、要求之间的影响关系及关键因素,以揭示城市开发管理影响水环境质量的内在机理与机制(图 2)。

利用多源动态数据,通过“三值联动”矩阵分析,可以构建一个城市开发容量评估与问题诊断系统,以精确评估每个单元的开发情况并对水质问题进行诊断。根据效应值和目标值可以评估城市开发状况(规划建设部门职责):若效应值>目标值,说明城市开发超过了水环境容量,反之,则水环境容量尚余;根据实测值和目标值可以判断城市现状水质是否超标,同时也能反映城市末端水治理工作(属地环保水利部门职责)是否

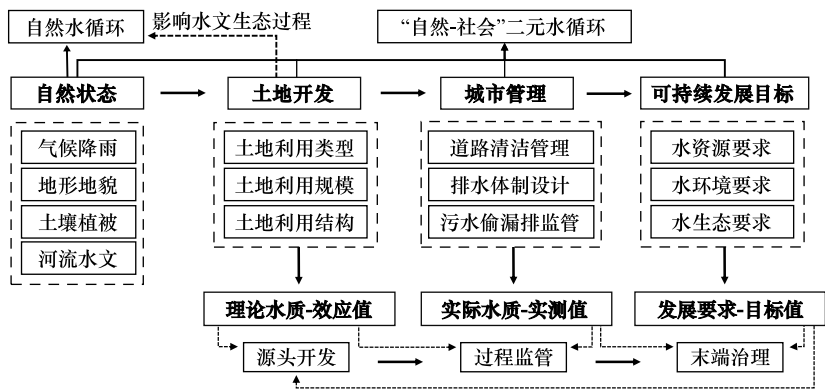


图 2 水-土耦合视角下的城市水质“三值”概念设计

Fig.2 Conceptual design of “three values” of urban water quality under the perspective of land-water coupling

到位;若实测值>目标值,说明现状水质已超标,末端水治理未到位,反之,则未超标且末端治理有成效;根据实测值和效应值来评价水环境过程监管(城管环保部门职责)和末端治理(属地环保水利部门职责)是否到位;若效应值>实测值,说明末端治理有一定成效但无法判断过程监管是否见效,反之,则说明过程监管存在漏洞且末端治理也没有到位。基于此,首先根据效应值与目标值的关系划分为“水环境容量亏损”和“水环境容量盈余”两种情况,其次在不同开发情况下分“水质超标”与“水质达标”两类,总共划分为六种情景,并对不同情景进行问题诊断(表 2)。

表 2 基于“三值联动”分析的城市开发容量评估与水质问题诊断

Table 2 Assessment of urban development capacity and diagnosis of water quality problems based on “tri-value linkage” analysis

开发情况 Development status	水质状况 Water condition	三值情况 Triple value	问题诊断 Problem diagnosis
水环境容量亏损 (效应值>目标值) Water environment capacity deficit (effect value> target value)	水质超标 (实测值>目标值)	实测值>效应值>目标值	过量开发且水质超标,过程监管缺位(实测>效应)且末端治理不充分(目标<实测)
		效应值>实测值>目标值	过量开发且水质超标,有末端治理(效应>实测)但不到位(实测>目标),无法消弭过量开发带来的影响
	水质达标 (实测值<目标值)	效应值>目标值>实测值	过量开发但水质达标,末端治理成效显著(效应>实测且目标>实测),弥补了过量开发带来的影响,使水质达标
水环境容量盈余 (效应值<目标值) Water environment capacity surplus (effect value< target value)	水质超标 (实测值>目标值)	实测值>目标值>效应值	未过量开发但水质超标,虽尚存开发容量,但过程监管缺位(实测>效应),末端治理也不够充分(目标>实测)
	水质达标 (实测值<目标值)	目标值>实测值>效应值	未过量开发且水质达标,过程监管缺位(实测>效应),但科学开发(目标>效应)且末端治理到位(目标>实测),使水质达标
		目标值>效应值>实测值	未过量开发且水质达标,科学开发(目标>效应)且地方的末端水治理成效显著(目标>实测)

2.3 数据处理

2.3.1 水质特征值

水质效应值通过 SWAT 水文模拟得出。研究区内多年降水主要集中在 5—9 月,约占全年降水量的 60%。为减小水质对土地利用及景观格局的响应受到集中降水的影响^[36],将本研究中的水质模拟时间定为 2022 年 9 月。利用 SWAT 水文模型,对研究时段内不同子流域的水质进行模拟。根据模型输出结果及城市地表径流特征^[37—38],按照《地表水环境质量标准(GB3838—2002)》计算出各个水管理单元的模拟水质类别即水质效应值。效应值的数值越高表明径流面源污染程度越高,反之则表明污染程度越低。

水质实测值数据来自蔚蓝地图官网。利用 ArcGIS 将蔚蓝地图官网 2022 年 9 月公布的监测点水质数据与水管理单元叠加,根据不同管理单元内水质监测值的变异系数计算得到 86 个水管理单元的现状水质,并按

照《地表水环境质量标准(GB3838—2002)》划分水质类别,得到各个管理单元的水质实测值。实测值的数值越高,表明单元内的现状水质越差,反之则表明现状水质越好。

各个水管理单元的水质管控目标即水质目标值。根据《浙江省水功能区水环境功能区划分方案(2015)》《杭州市治污水暨水污染防治行动 2020 年实施计划》等文件,综合考虑各管理单元所在的水环境功能区以及部分断面的近期考核要求,得出水质目标值。目标值的数值较低表明该单元内水环境保护要求较高,反之则表明水环境保护要求较低。

2.3.2 土地利用特征值

本文选取能够表征土地利用规模的建设用地占比^[12, 39]和表征土地利用格局的源汇指数^[10, 16, 40]反应研究单元的土地利用情况。其中,“源汇指数”借鉴了防治大气污染科学中“源”“汇”的概念,将耕地、空地、居住用地、道路广场、商业用地、工矿用地等对地表径流起到源头污染作用的用地定义为“源类用地”,通过源类指数衡量,而林地、水域、园地等起削减作用的定义为“汇类用地”,用汇类指数衡量,并通过计算源类指数和汇类指数的自然对数值得到源汇指数。计算公式如下:

$$SL = \sum_{i=1}^n P_i \times \frac{W_i}{S} \quad (1)$$

$$CL = \sum_{j=1}^n P_j \times \frac{W_j}{S} \quad (2)$$

$$R_SC = \lg\left(\frac{SL}{CL}\right) \quad (3)$$

式中, SL 、 CL 、 R_SC 分别为源类指数、汇类指数以及源汇指数; P_i 、 P_j 分别为水管理单元中不同源类用地和汇类用地的面积; W_i 、 W_j 分别为源类、汇类用地的权重^[16]; S 为水管理单元面积。 SL 越大表明水管理单元对污染物的输出能力越强; CL 越大则表明水管理单元对污染物的截留能力越强,相应水质就越好。 R_SC 是反映源类、汇类用地对水质影响的综合指标,由公式(3)可以看出, R_SC 越大则表明该单元对污染物的输出能力越强,反之表明截留能力越强。

3 结果分析

3.1 杭州市水质三值分布特征

分别计算各个研究单元内的水质实测值、效应值及其所在水环境功能区的水质目标值,得到研究单元三个值的分布情况(图3)。

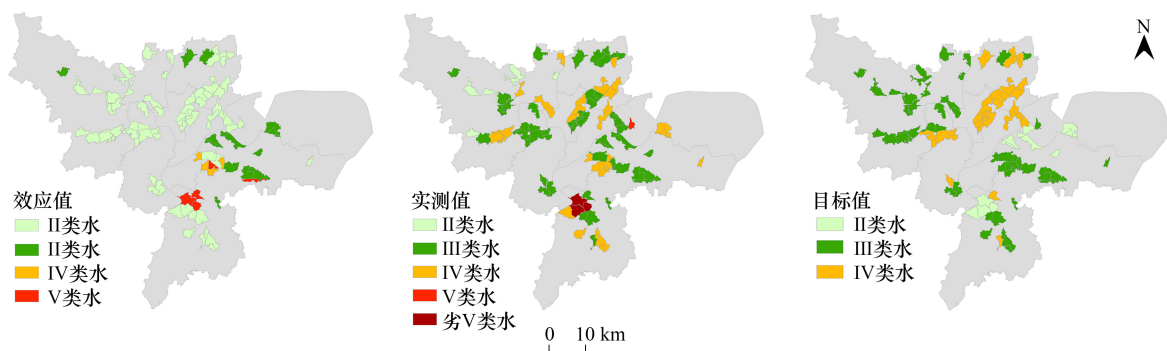


图3 研究单元效应值、实测值和目标值

Fig.3 The effect value, measured value, and target value of the research units

从效应值分布来看,大部分研究单元的水质效应值较好,为II类水和III类水;萧山和滨江的部分单元如西

兴单元、北干单元、闻堰单元等效应值相对较差,为Ⅳ类水和Ⅴ类水。对比上述两区整体的自然状况和土地利用情况可以发现,效应值水质为Ⅳ类、Ⅴ类水的单元土地利用类型以新近开发的高密度居住商业与道路广场等用地为主。

从实测值分布来看,杭州市较好的水质区域主要分布在城西片区,如余杭区的余杭、良渚、径山、瓶窑单元以及临平区的崇贤单元,它们大多为Ⅱ类水;其次是西湖区、上城区、拱墅区以及临平区的研究单元,以Ⅲ类水和Ⅳ类水为主;最差的是钱塘区的白杨单元和萧山区西部的义桥、闻堰、蜀山单元,水质为Ⅴ类和劣Ⅴ类水。

从目标值分布来看,江南片区和城西片区的研究单元如萧山的义桥、南阳以及余杭的瓶窑等单元多位于钱塘江杭州饮用水水源保护区、苕溪余杭饮用水源区,功能区的水质要求较高,为Ⅱ类水。而西湖区、拱墅区、萧山区和临平区的大部分研究单元位于西湖景观用水区、运河城市景观娱乐用水区、萧山河网工业用水区等功能区,对水质的要求相对降低,以Ⅲ类水和Ⅳ类水为主。

3.2 矩阵分析与情景诊断

根据三值比较的不同情况划分为表 1 所示的六种情景,得到 86 个研究单元的情景分布(图 4)。整体来看,过量开发(效应值>目标值)的研究单元主要分布在萧山区中部、滨江区北部以及钱塘区南部,城西和城北的研究单元均未过量开发(目标值>效应值);水质超标(实测值>目标值)的研究单元主要集中在萧山区中部和南部以及余杭区东部,其余大部分地区水质未超标(目标值>实测值);过程监管和末端治理有漏洞(实测值>效应值)的研究单元较多,主要集中在萧山区中部以及城西和城北。六种情景中,“目标值>实测值>效应值”的情景最多(51 个),主要分布在城西和城北,说明杭州大部分地区尚有开发容量且水质未超标,但过程监管有待加强;其次是“实测值>目标值>效应值”(16 个)和“实测值>效应值>目标值”(8 个)的情景,主要分布在萧山区南部和北部以及余杭区东部,前者说明未过量开发但水质超标,后者说明已过量开发且水质超标,表明杭州国土开发仍有较多地区存在水质超标的现象,过程监管和末端治理均有待加强。

统计各研究单元的用地类型构成、建设用地占比以及源汇指数(图 5),对六种情景作深入分析和问题诊断(表 3),可知:

(1)82.6%的研究单元属于科学开发(目标值>效应值),其余过度开发的单元(效应值>目标值)主要集中在钱塘江东部的萧山科技城、钱江世纪城、湘湖新城几个板块。评估结果为“水环境容量亏损”的研究单元有两种情况,一种是城市建设用地占比和源汇指数均较大的情况,如北干、宁围西南等单元;另一种是城市建设用地占比和源汇指数均较小,但研究单元的水质保护要求较高,即开发容量本身较小的情况,如闻堰、河庄等单元。

(2)32.6%的研究单元水质超标(实测值>目标值),主要分布在萧山区中部;67.4%的研究单元水质要求达标(目标值>实测值),主要分布在城西(余杭区、西湖区)和城北(拱墅区、临平区)。水质达标的研究单元一方面水质要求较低,如位于西湖景观用水区、萧山河网工业用水区的研究单元;另一方面,大多研究单元在末端治理方面有一定的成效,如城西的婴儿港、和睦港等多条城市河道率先采用了效率高、破坏小的生态清淤;钱塘直河通过人工富氧、搭设生态浮床、种植水生植物、放养底栖水生动植物等自然生态修复措施对水体进行净化过滤。

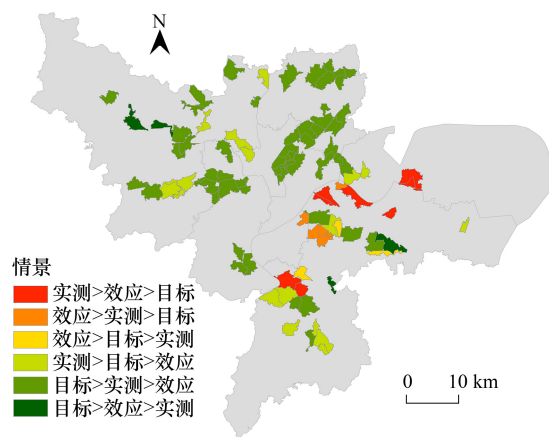


图 4 研究单元水质情景分布

Fig.4 Distribution of water quality scenarios in research units

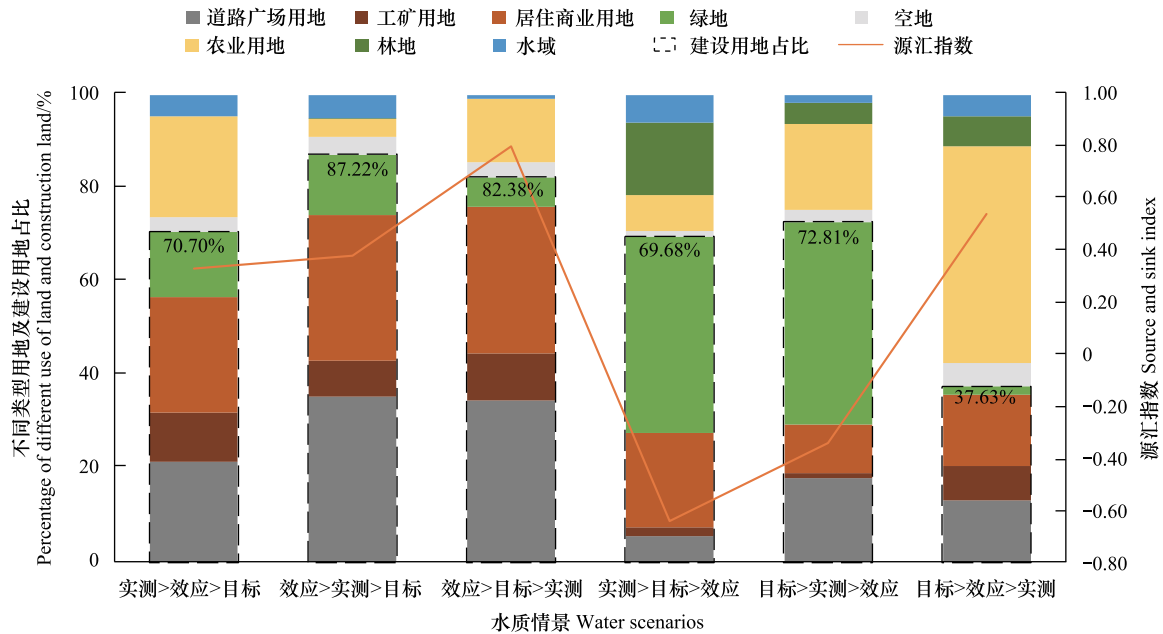


图5 六类城市开发情景与水质管理状况

Fig.5 Six types of urban development scenarios and water quality management status

表3 研究单元开发特征、水质情景分布及问题诊断

Table 3 Distribution of water quality scenarios and regional characterization of the research units

开发情景 Development status	水质情景 Water scenario			开发类型特征 Characteristics	问题诊断 Problem diagnosis
	三值情况 Triple value	个数 Quantity	占比/% Proportion		
水环境容量亏损 Water environment capacity deficit	实测值>效应值>目标值	8	9.3	分布在萧山北部和西部以及钱塘中部。除宁围北单元(60.8%水域)外,其他单元建设用地占比均值为64.2%,用地以居住商业、农业和城市绿地为主;源汇指数均值为-0.03。水质保护目标较高均为Ⅱ类水。	(1)开发容量超限,规划、建设部门需平衡源汇用地布局以减少源头污染; (2)水质超标,过程监管和末端治理缺位,城管、环保和水利部门需加强职能监管。
	效应值>实测值>目标值	4	4.7	分布在萧山区和滨江区。除宁围北单元(48.5%水域),其他单元建设用地占比均在85.0%以上,是六种情景中建设用地占比最高的,用地以居住商业和道路广场为主;源汇指数均值为0.46。水质保护目标以Ⅲ类水为主。	(1)开发容量超限,规划、建设部门需平衡源汇用地布局以减少源头污染; (2)水质超标,过程监管无法判断,有一定的末端治理但未到位,城管、环保和水利部门需加强职能监管。
	效应值>目标值>实测值	3	3.5	分布在萧山区,其中蜀山北单元林地占比高,整体建设用地占比只有43.4%,其余两个单元的建设用地占比均在80.0%以上,用地以居住商业和道路广场为主;源汇指数均值为0.38。水质保护目标以Ⅲ类水为主。	(1)开发容量超限,规划、建设部门需平衡源汇用地布局以减少源头污染; (2)水质未超标,过程监管无法判断,末端治理有成效。
水环境容量盈余 Water environment capacity surplus	实测值>目标值>效应值	16	18.6	主要分布在萧山南部和余杭东部,萧山北部、钱塘区和拱墅区也有少量分布。城市建设用地占比均值为66.2%,以居住商业、城市绿地和道路广场用地为主;源汇指数均值为0.17。单元的水质保护目标为Ⅱ类水或Ⅲ类水。	(1)开发容量有余; (2)水质超标,过程监管和末端治理缺位,城管、环保和水利部门需加强职能监管。

续表

开发情景 Development status	水质情景 Water scenario			开发类型特征 Characteristics	问题诊断 Problem diagnosis
	三值情况 Triple value	个数 Quantity	占比/% Proportion		
	目标值>实测值>效应值	51	59.3	分布在杭州市的各个区域,其中西湖区、上城区和临平区的单元均属于该类情景。城市建设用地占比均值为 70.6%,以居住商业、耕地和道路广场用地为主;源汇指数均值在 0.25。水质保护目标为Ⅲ类水或Ⅳ类水。	(1)开发容量有余; (2)水质未超标,末端治理工作到位,但其过程监管环节还存在问题,应强化过程监管。
	目标值>效应值>实测值	4	4.7	主要分布在萧山区东部和余杭区西部,城市建设用地占比均值为 57.2%,以耕地、居住商业、道路广场和工矿用地为主;源汇指数均值在 0.38,表明整体源汇用地布局较为平衡。水质保护目标均为Ⅲ类水。	(1)开发容量有余; (2)水质未超标,过程监管和末端治理均比较到位。

(3)87.2%的研究单元存在过程监管或末端治理水平落后的情况(实测值>效应值),结合目标值和实测值进一步分析,其中 68.0%研究单元的末端治理到位但过程监管还存在漏洞(目标值>实测值),其余 32.0%的研究单元在过程监管和末端治理上都有漏洞(实测值>目标值);江南片区和城西片区的部分地区如西兴街道、所前镇、瓜沥镇、衙前镇等单元的过程监管和末端治理水平较高(效应值>实测值),如滨江区探索的智慧水务工作、萧山所前镇启动的全水域数字管养云平台项目、萧山区瓜沥衙前两镇实行的水环境治理“流域共治”模式借助大数据、多方合作等手段共同进行水环境治理,提高了治理效率。

4 结论与建议

4.1 结论

本研究探索了“水-土耦合”的城市开发容量评估与水环境问题诊断方法,主要结论如下:(1)基于“水-土耦合”与流域精细化管理需求,按照流域单一性、水质管控目标统一性、行政主体唯一性三大原则,采用空间叠置分析将控制断面、子流域、行政区三要素集于一体形成水管理单元,明确了属地管理部门的责任边界。(2)从“水-土耦合”视角,引入水质效应值、实测值与目标值三个概念,构建了基于“三值联动”分析的城市开发容量评估与水质问题诊断系统,并以杭州为例,精准研判两大类共计六种不同的城市开发与治理情景。

本研究提出的城市开发容量评估与诊断系统综合考虑了水环境保护与国土空间开发需求,弥补了当前土地开发的水资源论证制度“重水量、轻水质”的不足,优化了水生态格局的理论与方法;惟有科学合理的水生态格局才能保护水环境质量,保障水资源数量。因此,“水-土耦合”的城市开发本质上就是统筹“水生态格局—水环境质量—水资源利用”的过程。

4.2 建议

为进一步统筹完善国土空间与水环境的全过程、精细化治理,在水环境保护工作目标下,建议围绕水环境治理的源头控制、过程监管、末端治理三大环节,构建出“管理单元划分—开发情景识别—水质问题溯源”的“水-土耦合”的国土空间开发治理新路线(图 6):

第一步,科学划分管理单元,明确属地责任边界,优化用途管制基础。针对一直以来水环境管理界线模糊、条块职责不清、治标不治本的尴尬困境,从水生态功能区、水环境功能区、水行政管理区与国土空间用途管制区“四区”耦合联动的视角,科学划分水管理单元,自上而下构建“流域-行政区-管理单元-污染源”的水环境管控体系,不断优化“水-土耦合”的国土空间用途管制基础。

第二步,充分利用数字技术,构建协同治理平台,增强用途管制手段。整合各管控单元的土地利用、城市管理、水质监测等多源动态数据,及时获取有关旧城更新改造、基础设施建设、水污染防治以及河道巡查、监测、清淤等日常养护相关信息,建立动态更新机制,持续提升信息系统数据的丰富度和精准度,形成“源头-过

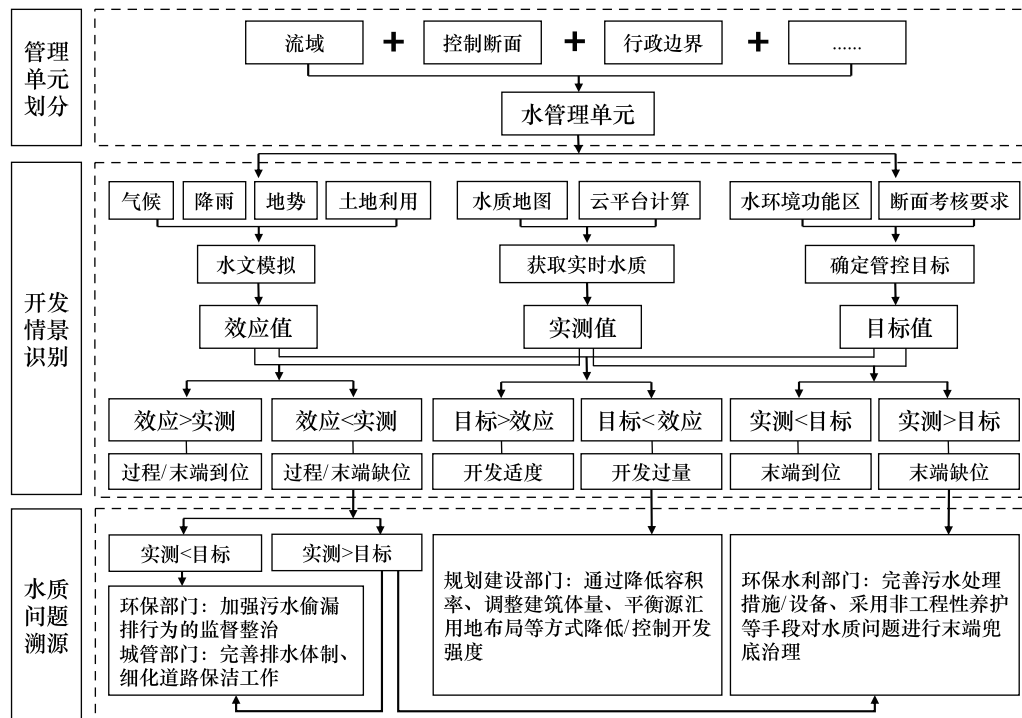


图6 “水-土耦合”的全过程国土空间治理技术路线

Fig.6 Technical route for the entire process of territorial space governance of “land-water coupling”

程-末端”全过程的国土空间治理“一张图”,进而构建“生态智卫”数字化协同治理平台,对水环境问题进行空间汇聚和实时管控,不断增强用途管制手段。

第三步,精准研判矩阵情景,提出相应优化策略,提高用途管制水平。根据系统诊断结论,提出相应优化策略:首先,识别过度开发地区,抓住旧城改造契机进行源头管控,通过降低开发容量、调整用地性质、平衡源汇用地布局等方式优化国土空间用途管制;其次,对于开发容量有余但水质不达标的建成区域,则需重点关注过程监管环节;最后,以末端治理作为“兜底”方案,针对源头管控及过程监管落实到位但仍无法使水质达标的情况,则需进一步完善污水处理措施/设备、采用非工程性养护(譬如人工增氧和水生动植物养殖)等手段对水质进行末端兜底治理,使其最终达到管理目标。

建立“水-土耦合”的国土空间治理系统,是数字化改革背景下国土空间全域全要素管控的重要课题。尽管本研究提出的多源动态数据融合的“城市开发容量评估诊断系统”克服了以往水环境治理中成因不明、责任边界不清等缺点,精准溯源与管控水环境问题,为国土空间治理提供了一种更为智慧的途径与方法。但该方法仍存在不足:在系统构建与多情景分析过程中,对于城市“开发容量”的评估仅考虑了用地类型、用地规模等二维指标,而容积率、建筑高度这类表征开发强度的三维指标欠缺考虑,这需要在更强的技术与更广泛的数据支持下得以持续优化和完善。

参考文献 (References):

- [1] 生态环境部. 中国生态环境状况公报. (2023-05-29). <http://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/zghjzkgb/index.shtml>.
- [2] 国务院. “十三五”生态环境保护规划. (2016-12-05). https://www.gov.cn/zhengce/content/2016-12/05/content_5143290.htm.
- [3] 王小平, 张飞, 李晓航, 曹灿, 郭苗, 陈丽华. 艾比湖区域景观格局空间特征与地表水质的关联分析. 生态学报, 2017, 37(22): 7438-7452.
- [4] 杨强强, 徐光来, 杨先成, 李爱娟, 陈晨. 青弋江流域土地利用/景观格局对水质的影响. 生态学报, 2020, 40(24): 9048-9058.
- [5] 朱爱萍, 原升艳, 温姗姗, 黄波波, 冯小蕾, 谢正兰. 不同空间尺度的景观格局对溪流河水质的影响. 生态学报, 2023, 43(4): 1485-1495.

- [6] 代孟均, 张兵, 杜倩倩, 孙季琿, 田蕾, 王义东. 不同缓冲区的土地利用方式对地表水水质的影响: 以海河流域天津段为例. 环境科学, 2024, 45(3): 1512-1524.
- [7] 袁梦祥, 赵洛琪, 高雨晗, 黄律, 马旭东, 沈春节, 刘嫦娥, 付登高, 段昌群. 考虑空间尺度效应的云南异龙湖流域主要入湖河流污染源解析. 湖泊科学, 2024, 36(3): 770-781.
- [8] Shehab Z N, Jamil N R, Aris A Z, Shafie N S. Spatial variation impact of landscape patterns and land use on water quality across an urbanized watershed in Bentong, Malaysia. *Ecological Indicators*, 2021, 122: 107254.
- [9] Wang W Y, Yang P, Xia J, Huang H Q, Li J. Impact of land use on water quality in buffer zones at different scales in the Poyang Lake, middle reaches of the Yangtze River Basin. *The Science of the Total Environment*, 2023, 896: 165161.
- [10] 岳隼, 王仰麟, 李贵才, 吴健生, 谢苗苗. 不同尺度景观空间分异特征对水体质量的影响——以深圳市西丽水库流域为例. 生态学报, 2007, 27(12): 5271-5281.
- [11] 裴宇, 周旭, 蒋啸, 陈大蓉, 敖杨, 胡玉雪. 基于土地利用和景观格局的高原山区湖库水质变化主要贡献因子分析. 水土保持通报, 2022, 42(6): 247-257.
- [12] 温嘉伟, 王鹏, 黄高翔, 张华, 聂明华, 丁明军, 折远洋. 土地利用结构与空间格局对鄱阳湖流域中小河流水质的影响. 环境科学, 2023, 44(12): 6728-6743.
- [13] 卢薪宇, 宋正娜, 李建. 多空间尺度下土地利用类型对长三角地区水质的影响研究. 长江流域资源与环境, 2024, 33(3): 537-546.
- [14] Shrestha S, Bhatta B, Shrestha M, Shrestha P K. Integrated assessment of the climate and landuse change impact on hydrology and water quality in the Songkhram River Basin, Thailand. *The Science of the Total Environment*, 2018, 643: 1610-1622.
- [15] Jiang J, Wang Z L, Lai C G, Wu X S, Chen X H. Climate and landuse change enhance spatio-temporal variability of Dongjiang River flow and ammonia nitrogen. *The Science of the Total Environment*, 2023, 867: 161483.
- [16] 陈前虎, 吴昊. 国土空间开发“源汇”格局对河道水质的影响——以杭州市 11 个排水分区为例. 城市规划, 2020, 44(7): 28-37.
- [17] 薛树红, 李明, 吴巍, 吕家珑, 马勃, 周晓平, 姚普静, 杨霄. 基于多耦合模型的盛桥河流域水环境模拟研究. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2021, 49(7): 83-94.
- [18] 魏家星, 倪雨淳, 寿田园, 张昱镇. 基于水-陆耦合生态系统服务的生态安全格局构建研究——以长三角生态绿色一体化发展示范区为例. 生态学报, 2023, 43(13): 5305-5319.
- [19] Sajedi-Hosseini F, Malekian A, Choubin B, Rahmati O, Cipullo S, Coulon F, Pradhan B. A novel machine learning-based approach for the risk assessment of nitrate groundwater contamination. *The Science of the Total Environment*, 2018, 644: 954-962.
- [20] Nepal D, Parajuli P B, Ouyang Y, Filip To S D, Wijewardane N. Assessing hydrological and water quality responses to dynamic landuse change at watershed scale in Mississippi. *Journal of Hydrology*, 2023, 625: 129983.
- [21] 王飞儿, 郑思远, 杨泓蕊, 俞洁, 王一旭, 王浙明. 基于生态系统服务的浙江省水生态环境分区分类管控. 生态学报, 2022, 42(2): 539-548.
- [22] 李静, 沈梦兰, 何立山, 王红, 张红霞. 不同水质目标下居延海(东)水环境容量分析. 中国环境监测, 2022, 38(3): 120-125.
- [23] 陈俊颖, 张亚辉, 杨吉强, 王燕鹏, 安树青, 阮晓红. 基于水质目标管理的水功能区调整实践. 南京大学学报(自然科学), 2022, 58(2): 235-245.
- [24] 高俊峰, 张志明, 蔡永久, 黄佳聪. 水生态保护目标制定的理论与应用. 生态学报, 2022, 42(14): 5677-5691.
- [25] Sun L H, Shu C, Ding L, Tian Z Q, Liu H. Zoning method of aquatic ecosystem functional management fourth-level region in the Daqing River Basin, China. *Journal of Environmental Management*, 2023, 327: 116870.
- [26] 贾梦圆, 陈天, 臧鑫宇. 耦合水资源环境的城镇用地扩张多方案预后与规划路径——以天津市为例. 城市规划学刊, 2021(3): 58-65.
- [27] 王晓锋, 刘红, 袁兴中, 任海庆, 岳俊生, 熊森. 基于水敏性城市设计的城市水环境污染控制体系研究. 生态学报, 2016, 36(1): 30-43.
- [28] 王娇, 马克明, 张育新, 唐荣莉. 土地利用类型及其社会经济特征对河流水质的影响. 环境科学学报, 2012, 32(1): 57-65.
- [29] 陈娜, 马伯, 向辉, 高博宇, 严湘琦. 基于径流目标分解的南方低山丘陵区海绵城市建设——以湖南凤凰县为例. 经济地理, 2018, 38(8): 67-75.
- [30] 王飞, 陶芹, 程宪波, 陶宇, 欧维新, 刘敬杰. 快速城镇化地区景观格局变化对水生态系统服务的影响. 水土保持学报, 2023, 37(1): 159-167.
- [31] Lyu L T, Bi S Q, Yang Y, Zheng D F, Li Q. Effects of vegetation distribution and landscape pattern on water conservation in the Dongjiang River Basin. *Ecological Indicators*, 2023, 155: 111017.
- [32] 方玉杰, 王金保, 罗定贵, 孙善磊, 陈春丽. 流域总量控制下赣江流域控制单元划分技术. 环境科学研究, 2015, 28(4): 540-549.
- [33] 秦大唐, 陆垂裕, 刘家宏, 王浩, 王建华, 李海红, 褚俊英, 陈根发. 流域“自然-社会”二元水循环理论框架. 科学通报, 2014, 59(Z1): 419-427.
- [34] 徐宗学, 李鹏. 城市化水文效应研究进展: 机理、方法与应对措施. 水资源保护, 2022, 38(1): 7-17.
- [35] 周丰, 刘永, 黄凯, 郭怀成, 阳平坚. 流域水环境功能区划及其关键问题. 水科学进展, 2007, 18(2): 216-222.
- [36] 胡琳, 李思悦. 不同空间尺度土地利用结构与景观格局对龙川江流域水质的影响. 生态环境学报, 2021, 30(7): 1470-1481.
- [37] 吴昊, 陈前虎, 张沛少. 杭州城市河道氮磷的空间分布及影响要素研究//中国城市规划学会, 成都市人民政府. 面向高质量发展的空间治理——2020 中国城市规划年会论文集(08 城市生态规划). 中国建筑工业出版社, 2021.
- [38] 车伍, 刘燕, 李俊奇. 国内外城市雨水水质及污染控制. 给水排水, 2003, 29(10): 38-42.
- [39] 项颂, 庞燕, 窦嘉顺, 吕兴菊, 薛力强, 储昭升. 不同时空尺度下土地利用对洱海入湖河流水质的影响. 生态学报, 2018, 38(3): 876-885.
- [40] 吕志强, 庆旭瑶, 任玉芬, 王效科, 庞容. 山地城市河流土地利用结构对水质的影响——以重庆市为例. 湖泊科学, 2016, 28(2): 319-327.