试验研究

城市建设用地海绵化程度对地表径流水质的影响
——以浙江省嘉兴市为例

陈前虎[1]，李玉莲[1]，黄初冬[1]，王贤萍[2]

(1. 浙江工业大学 建筑工程学院，浙江 杭州 310023；2. 嘉兴市规划设计研究院，浙江 嘉兴 314000)

摘　要：[目的] 探究海绵化程度与地表径流水质的关系，为缓解当前地表径流污染的海绵设施建设提供理论依据。[方法] 以国家首批海绵城市试点嘉兴市为例，选取 20 个不同海绵化程度的项目为研究单元，建立可表征海绵设施类型、数量和布局等海绵化程度的指标，并采用冗余分析、偏最小二乘法、Origin 拟合方程等方法进行分析。[结果] ① 样本中居住小区和公共建筑区域的水质均未满足地表水Ⅳ类及污水排放二级标准；已改造建设用地水质普遍优于未改造建设用地。②绿地和有效不透水下垫面(effective impervious area，EIA)比例是影响径流水质的关键因素，其中悬浮物(SS)，生化需氧量(BOD_5)和化学需氧量(COD)是主要受影响指标。③为使径流水质达到海绵城市建设要求，不同海绵化程度下的用地需要管控的指标阈值有差异。[结论] EIA≈0 时，绿地比例应不低于 31%；$EIA=0.04(TIA)^{1.7}$ 时〔其中 TIA(total impervious area)为总不透水下垫面〕绿地比例应不低于 38.5%；EIA＝TIA 时，绿地比例应不低于 47%；若维持现行的城市绿地比例(约为 35%)建设标准，EIA 比例应不超过 9%。

关键词：海绵化程度；径流水质；有效不透水下垫面；冗余分析；偏最小二乘法

文献标识码：A　　**文章编号**：1000-288X(2019)04-0001-08　　**中图分类号**：TU984

文献参数：陈前虎，李玉莲，黄初冬，等. 城市建设用地海绵化程度对地表径流水质的影响[J]. 水土保持通报，2019，39(4)：1-8. DOI：10. 13961/j. cnki. stbctb. 2019. 04. 001；Chen Qianhu，Li Yulian，Huang Chudong，et al. Effects of spongification degree on surface runoff water quality in urban construction land [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2019，39(4)：1-8.

Effects of Spongification Degree on Surface Runoff Water Quality in Urban Construction Land
—A Case Study in Jiaxing City of Zhejiang Province

Chen Qianhu[1]，Li Yulian[1]，Huang Chudong[1]，Wang Xianping[2]

(1. *College of Civil Engineering and Architecture，Zhejiang University of Technology，Hangzhou，Zhejiang* 310023，*China*；2. *Jiaxing Planning and Design Research Institute，Jiaxing，Zhejiang* 314000，*China*)

Abstract：[Objective] This paper aims at exploring the relationship between the spongification degree and the quality of surface runoff，so as to provide guidance for the construction of sponge facilities alleviating current surface runoff pollution. [Methods] Jiaxing City is one of the pilot sponge cities in China and was taken as a study area，where 20 projects with different spongification degrees were selected as analysis units. Indicators were established reflecting the spongification degree，such as the type，quantity and layout of sponge facilities. Redundancy analysis，partial least squares method and Origin fitting equation were introduced in the study. [Results] ① Neither the water quality of residential area nor of public buildings areas attained class Ⅳ of surface water and secondary standards for sewage discharge. The water quality of the sponging-transformed area was generally better than that of the untransformed area. ② The area ratio of green space to effective impervious area(EIA) is the key factor affecting runoff water quality，of which suspended solids(SS)，bichemical oxygen demand(BOD_5) and chemical oxygen demand(COD) are the mainly affected indicators.

收稿日期：2019-01-04　　**修回日期**：2019-01-25

资助项目：国家重大社科项目“海绵城市建设的风险评估与管理机制研究”(16ZDA018)

第一作者：陈前虎(1971—)，男(汉族)，浙江省浦江县人，博士，教授，硕士生导师，主要从事城市发展与管理方面的研究。E-mail：chenqianhu@zjut. edu. cn。

通讯作者：李玉莲(1994—)，女(汉族)，安徽省合肥市人，硕士研究生，主要研究方向为海绵城市建设规划与风险评估。E-mail：2315690514@qq. com。

③ In order to make the runoff water quality meet the requirements of sponge city construction, thresholds for the control of land use under different spongification degree should be different. [Conclusion] When EIA ≈0, the proportion of green space should be no less than 31%; when EIA = 0.04(TIA)$^{1.7}$ (TIA is the total impervious area), the proportion of green space should be no less than 38.5%; when EIA = TIA, the proportion of green space should be no less than 47%. The ratio of EIA should not exceed 9% under the current urban green space ratio standard(about 35%).

Keywords: spongification degree; runoff water quality; effective impervious area; redundancy analysis; partial least squares regression analysis

为解决城市化进程中因地表硬铺率[1](impervious surface ratio,ISR)增加带来的径流水质恶化问题,我国提出了基于"渗、滞、蓄、净、用、排"为导向的海绵城市建设策略,出台了一系列有关的标准规范与技术导则[2-6]。这些文件均强调利用海绵设施对雨水径流的截留作用来控制径流污染负荷,并将年径流总量控制率作为控制径流污染物的重要指标,而年径流总量控制与地块的海绵化程度——海绵设施的类型、数量与布局等息息相关[7-10]。为此,在海绵城市的规划设计实践中,需要探究的两大科学问题主要是哪些因素对径流污染削减起关键性作用;为达到一定的水质控制目标,该如何处理这些因素间的量化结构关系。在各地加快实施海绵城市建设的背景下,有关建设用地海绵化程度与地表径流水质响应关系的研究迫在眉睫。围绕上述问题,国内外学者从时间和空间两维视角出发,采用多元统计方法或借助雨洪管理模型,分析和模拟不同用地类型和降雨强度下典型海绵设施对径流污染的影响[11-16]。刘文等[17-18]研究提出,海绵设施对污染物浓度的控制具有长期显著性,不同类型的设施对污染物浓度的削减程度差异明显;胡爱兵等[19-20]研究表明,优化海绵设施的布局结构有利于改善用地径流水质;Roy 等[21-22]发现,低影响开发主要通过改变总不透水下垫面(total impervious area, TIA)与排水收集系统的连通性来控制对雨水径流及污染负荷的拦截程度,且 TIA 分为有效不透水下垫面(effective impervious area, EIA,指与排水管渠直接连接的不透水下垫面)和无效不透水下垫面(ineffective impervious area, IIA,指与排水管渠断接的不透水下垫面),其中 EIA 是导致雨水中污染负荷增加的主要因素;Sohn 等[23-25]研究认为,EIA 是评价 LID 设施截留雨水径流能力的重要参考指标。这些研究表明海绵化程度对径流水质有重要影响,为从土地利用视角控制径流污染提供了理论基础和新的视角与方法。但如何量化、揭示并管控海绵化程度与径流水质的响应关系,在理论和实践中均具有重大意义,值得进一步探索。基于此,本文以首批海绵城市试点——嘉兴市的 20 个海绵化改造不同程度的项目为研究单元,依托定点测量的数据,建立海绵化与地表径流水质两套指标;采用冗余分析、偏最小二乘法及 Origin 拟合方程,研究海绵化程度对径流水质的影响,明确对径流水质显著作用的海绵化指标,并尝试探究在水质达到地表水Ⅳ类及污水排放二级标准时,改造程度不同的用地需要管控的指标阈值,为海绵城市建设的控制性详细规划提供技术指导依据。

1 研究区概况

嘉兴市地处长三角冲积平原地带,地势平坦且水系丰富,是典型的水质型缺水城市。随着嘉兴市污水治理力度的推进,点源污染问题逐步解决,以径流污染为主的非点源污染对河道水质的影响日益增大。研究选取嘉兴市 10 个已海绵化改造半年以上(多位于海绵城市改造示范区内)和 10 个未海绵化改造(多位于示范区外)共 20 个单一性质的建设用地为样本(图 1)。为保证各样本排水管网系统的独立性以及用地面积的均等性,将府南三期小区以戚家村浜为界分为东区和西区,中央公园和植物园分别以由拳路、戚家浜为界分为南区和北区。样本用地类型有居住小区(10 个)、公共建筑(6 个)和公园(4 个)3 类,各用地容积率均在 1.5 及以下。

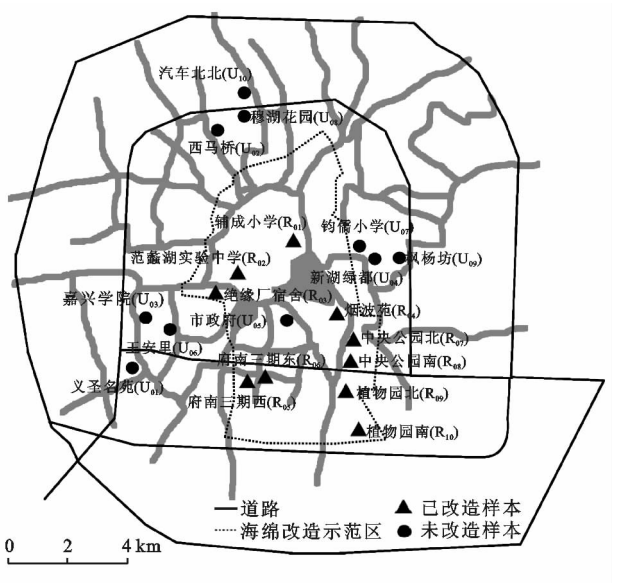


图 1 研究区建设用地样本点分布示意图

2　数据获取与研究方法

2.1　海绵化指标的获取

结合用地改造现状,所有研究区地面(含屋面)的类型可用 EIA、IIA、绿地(含各种 LID 设施)以及弱透水面(透水路面及水体)4 种类型来涵盖。依据下垫面的透水性强度、不透水下垫面与排水管网的断接或连接程度,选取 EIA 比例、IIA 比例、绿地比例以及弱透水比例作为衡量海绵化程度的指标。利用 Excel 软件及 Sutherland 经验公式[26]计算出各样本用地具体数值,其中 Sutherland 经验公式主要用于计算 EIA 比例,该公式解决了美国地质勘探局提出的仅适用于小流域(8～28 hm^2)内 EIA 值计算方法的局限性问题,具体方式参考表 1。结合各研究区海绵设施的建设施工现状及表 1 可知,研究样本中已改造居住小区和公共建筑的不透水区域与排水收集系统部分断接,公园用地的不透水区域与排水收集系统高度断接;未改造用地的不透水区域与排水收集系统完全连接。

表 1　依据 Sutherland 方程式求得的 EIA[23,26]

断接或连接程度	判断标准	Sutherland 方程式
高度或完全断接	区域内仅有一小部分或没有用地直接连接排水管道,70%及以上的雨水径流优先排到干井或者其他透水区域;	EIA≈0,TIA 比例不小于 1%
部分断接	区域内至少有 50%的下垫面与排水管道断接,主要为道路、草地、屋顶,部分干井或其他透水区域;	$EIA=0.04(TIA)^{1.7}$,TIA 比例不小于 1%
中度连接	区域内的雨水径流主要通过路缘石或排水管道排入河内,无干井或其他透水区域,屋顶的径流直接流入海绵设施;	$EIA=0.1(TIA)^{1.5}$,TIA 比例不小于 1%
高度连接	除屋顶外的其他不透水区域均与排水管道直接连接;	$EIA=0.4(TIA)^{1.2}$,TIA 比例不小于 1%
完全连接	区域内不透水下垫面均与排水管道直接连接;	EIA=TIA

2.2　水质数据的采集

水质数据采用人工时间间隔(每隔 10 min)采样法,选取 2017 年 3—8 月 10 场平均降雨强度等级为中雨的有效降雨,并在每块建设用地选取 2～3 个连接河道的地下管网雨水排出口作为水质采样点(共 45 个),由此获取 1391 份径流水质数据。研究选择悬浮物(SS)、生化需氧量(BOD_5)、化学需氧量(COD)、氨氮(NH_3-N)、总磷(TP)为水质指标,并利用 Grubbs 检验法[27]筛选数据并剔除离群值,最终求得多场降雨径流中各指标的平均浓度[28]。

2.3　研究方法

采用冗余分析定性判断海绵化程度与径流水质的相关性以及海绵化指标对水质指标的控制作用方向,运用偏最小二乘法定量分析海绵化指标对径流水质的影响权重、筛选出影响水质的关键指标,利用 Origin拟合方程预测改造程度不同的用地径流水质达到目标要求时,海绵化指标的响应阈值。

2.3.1　*冗余分析*　借助 Canoco 5.0 软件对各样本点不同水质指标进行降趋势对应分析可知,水质指标数据第一轴的梯度值为 0.171,远小于 3,故选择冗余分析[29]。冗余分析是一种基于排序技术的线性分析方法,通过样本点在象限的分布形态等方式来揭示研究区域的特点。

2.3.2　*偏最小二乘法*　偏最小二乘法是一种多因变量对多自变量的回归建模方法,通过提取自变量和因变量的主成分,筛选出对两变量解释性最强的综合变量,并解决了变量间的多重共线性问题[30]。

2.3.3　*Origin 拟合方程*　Origin 软件[31]自带多种非线性拟合函数,能方便、准确地拟合出两组变量数据间的最佳关系曲线,并可直观地了解变量的变化趋势及偏差。

3　结果与分析

3.1　海绵化指标特征

研究表明,样本用地的下垫面类型以 EIA 为主(公园用地除外),已改造建设用地的下垫面类型较未改造建设用地丰富(图 2)。已改造样本 R_{01}—R_{06} 的下垫面类型以 EIA 和绿地为主,R_{07}—R_{10} 的下垫面类型以绿地为主;未改造样本 U_{01}—U_{10} 的下垫面类型主要为 EIA,绿地次之。不同用地类型的绿地比例和透水比例(绿地和弱透水比例之和)差异明显,其中绿地比例由高到低依次为:公园(超过 70%)＞居住小区(超过 30%)＞公共建筑(除市政府 U_{05} 外均低于 25%);透水比例由高到低依次为:公园(超过 95%)＞居住小区(超过 52%)＞公共建筑(低于 45%)。公共建筑中汽车站的两项指标值最低(均为 11%)。当绿地比例相同时,已改造建设用地 EIA 比例(低于 45%)均低于未改造建设用地(超过 60%)。

3.2　水质指标特征

由图 3 可知,样本中部分已改造用地各水质指标的平均浓度未满足地表水Ⅳ类及污水二级排放标准,所有未改造用地各水质指标的平均浓度均未达到水

质要求。三种用地类型中公园的水质最好，居住小区次之，公共建筑的水质明显劣于前两者。公园的绿地比例和透水比例较高、EIA 比例较低，海绵设施布局较好；而公共建筑的绿地和透水比例较低、EIA 比例较高，海绵设施布局较差。20 个样本中，嘉兴汽车北站(U_{10})的水质最差，SS，BOD_5 等五项指标的平均浓度明显高于其他样本。对比样本 R_{01}—R_{06} 与 U_{01}—U_{06} 并结合图 2 发现，在相同的绿地比例下，已改造建设用地的 EIA 比例低于未改造建设用地，而水质则前者更优；随着绿地比例的上升，建设用地各项水质指标的平均浓度逐渐下降(R_{06} 与 U_{06} 除外)。

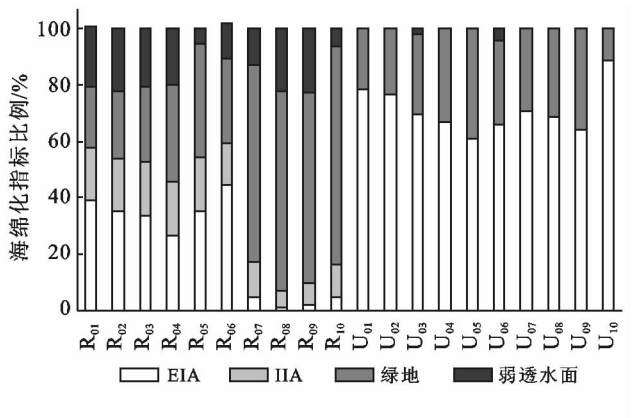


图 2 研究区各样本用地不同海绵化指标的比例

3.3 海绵化程度与径流水质响应分析

3.3.1 *海绵化指标与水质指标的关系* 借助 Canocc 5.0 软件对样本数据进行冗余分析，得出海绵化程度与水质的关系图(图 4)。图中，箭头长度及箭头间的夹角表示水质指标对各海绵化指标的响应程度，长度越长、夹角(锐角表示海绵化指标与水质指标呈正相关，钝角表示负相关)的余弦绝对值越大，说明二者相关性越大，反之越小。

由图 4 可知，影响各样本径流水质的海绵化指标类型差异显著。已改造公共建筑类样本(R_{01}—R_{06})主要受 IIA 比例影响，公园类(R_{08}，R_{09})和(R_{07}，R_{10})分别受绿地和弱透水比例影响明显；未改造样本(U_{01}—U_{10})则主要受绿地和 EIA 比例影响。EIA 比例与各水质指标呈显著正相关，表明建设用地内 EIA 是导致径流污染负荷增加的主要因素；绿地、弱透水和 IIA 三者比例与各项水质指标呈负相关关系，且绿地比例与水质指标的相关性最大，表明绿地对径流污染负荷的截留程度高于另外两者。SS，BOD_5，COD 和 NH_3-N 这 4 项水质指标受海绵化程度影响明显，TP 受海绵化程度影响不显著。对比 EIA 比例、IIA 比例与水质指标的相关性后发现，二者对各水质指标的作用方向互为相反，且 EIA 比例与各水质指标的相关性较 IIA 比例高。

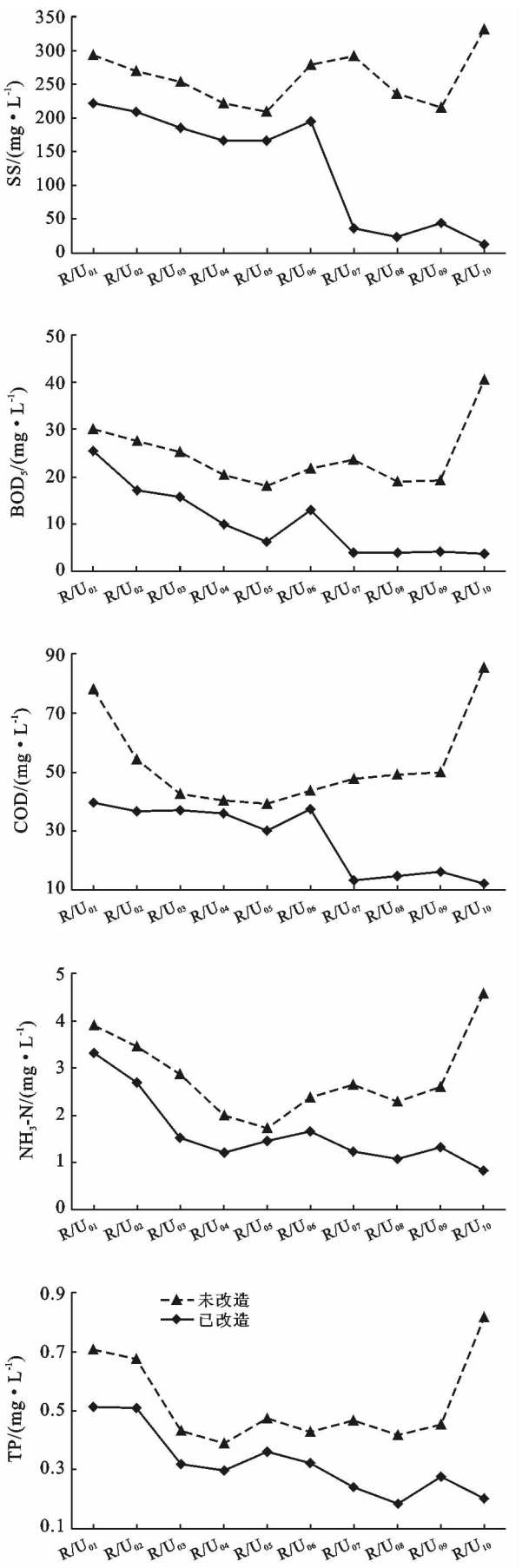


图 3 研究区不同建设用地水质指标空间变化

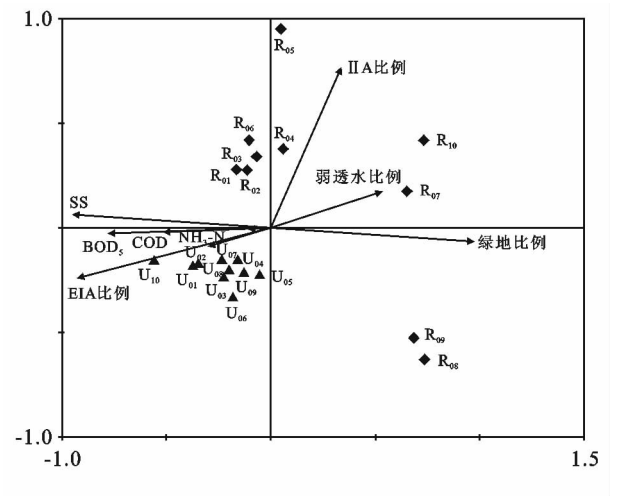


图 4　海绵化指标与水质指标的冗余分析

3.3.2　海绵化与水质关键指标的选取　本文运用SIMCA-P软件构建偏最小二乘回归模型,并在Analysis中点击 Autofit 功能对模型进行自动拟合。利用软件的交叉有效性原则提取出 2 个 PLS 成分,模型对 X 的信息利用率为 $R^2X(\mathrm{cum})=0.942$,对 Y 的解释能力为 $R^2Y(\mathrm{cum})=0.828$,且求得的交叉有效性值 $Q^2(\mathrm{cum})=0.781\,9$(大于 0.5),表示模型的精度较高。最终,得到经过标准化的偏最小二乘回归方程为:

$$f(x)=\alpha_\rho+\sum_{\rho=0}^{n}(\mu_\rho\cdot\beta_\rho) \tag{1}$$

式中:$f(x)$——水质指标浓度(mg/L);α_ρ——第 p 种海绵化指标对水质指标的影响常数项;μ_ρ——第 p 种海绵化指标的影响系数;β_ρ——第 p 种海绵化指标(%)。

不同海绵化指标对水质指标的影响系数如表 2 所示,影响大小顺序为:绿地比例>EIA 比例>IIA 比例>弱透水比例。其中,SS 受四项海绵化指标影响明显;BOD_5 和 COD 主要受绿地和 EIA 比例影响;海绵化指标对 NH_3-N 的影响不如其他水质指标显著,说明其不是导致 NH_3-N 平均浓度变化的最重要因素。综合来看,EIA 比例越大,各污染物的平均浓度越高,水质越差;绿地、IIA 和弱透水比例越大,各污染物的平均浓度越低,水质越好。降雨时,绿地及透水路面等透水区域的雨水经过渗透进入地下,不易形成地表径流,污染物负荷较难通过排水管网进入河道;IIA 虽为不透水区域,但与排水管道断接,其地表径流主要流向附近的海绵设施,未能直接进入排水管道。因此,提高建设用地内绿地及透水路面比例或将不透水路面的径流引入绿地等海绵设施、降低 EIA 比例,都将有利于控制用地内径流污染从而改善河道水质。

表 2　海绵化指标对水质指标的影响系数

类型	SS	BOD_5	COD	NH_3-N
常数	243.41	22.34	49.24	2.69
绿地比例	−2.95	−0.27	−0.49	−0.026
EIA 比例	1.39	0.14	0.25	0.012
弱透水比例	−0.33	−0.08	−0.16	−0.004
IIA 比例	−0.52	−0.09	−0.18	−0.006

海绵化指标对水质指标影响的重要程度,可通过变量投影重要性指标[32](variable importance in the projection, VIP)表示(图 5)。根据 VIP 排序图可知,绿地和 EIA 比例的 VIP 值大于 1,IIA 比例的 VIP 值介于 0.8,1 之间,而弱透水比例的 VIP 值小于0.8,表明绿地和 EIA 比例对水质指标具有显著解释意义,二者为影响水质的关键性指标。

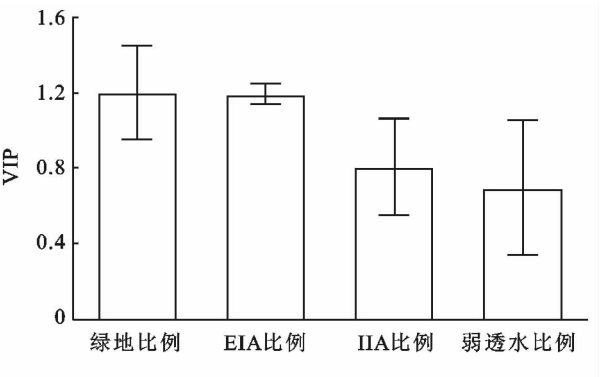


图 5　影响水质的海绵化指标 VIP 值排序

为了验证模型建立的优劣度和可靠性,需对模型进行预测分析。利用偏最小二乘回归方程求得各水质指标的预测值,结合实测值绘制的散点趋势图分析可知,拟合度较好($R^2>0.8$)的水质指标为 SS,BOD_5 和 COD,样本点多数均匀分布在对角线附近,表明 SS,BOD_5 和 COD 是受海绵化程度影响的主要指标。

3.3.3　海绵化指标的阈值探讨　综上分析,以 EIA 比例为 x 轴,以 SS,BOD_5 及 COD 三项指标的平均浓度为 y 轴,根据样本中不透水区域与排水管网系统断接或连接程度的不同,利用 Origin 2017 软件建立 9 个拟合方程;再以绿地比例为 x 轴,与其他三项水质指标建立 3 个拟合方程。根据研究获取的样本数据,可预测中度降水下,不同改造程度的用地径流水质达到地表水Ⅳ类及污水排放二级标准时,需要管控的海绵化指标的范围。

(1) 当 EIA≈0 时,即针对不透水区域与排水收集系统高度或完全断接的建设用地,随着绿地比例的上升,各水质指标的平均浓度均相应下降。由表 3 方程可知,若使建设用地的水质满足标准,绿地比例应不低于 31%。

(2) 当 $\mathrm{EIA}=0.04(\mathrm{TIA})^{1.7}$ 时,即针对不透水区

域与排水收集系统部分断接的建设用地，各项水质指标的平均浓度随着绿地比例的上升而降低，且斜率逐渐减小，其中 COD 对绿地比例变化的敏感性最高。由图 6 可知，绿地比例超过 38.5%时，建设用地的水质可满足标准。由此可见，目前嘉兴市已改造居住小区和公共建筑的绿地比例均有待提高。

(3) 当 EIA＝TIA 时，即针对未经过海绵化改造的建设用地，随着绿地比例的上升，各水质指标的平均浓度均下降，且 SS 的下降斜率逐渐增大，说明 SS 对绿地比例变化的敏感性更高。由图 7 可知，若使建设用地的径流水质满足要求，绿地比例应不低于 47%。目前看来，嘉兴市未改造居住小区和公共建筑的绿地比例均未超过 47%，径流污染较为严重。

(4) 在常规绿地比例建设标准(绿地比例≈35%)下，随着 EIA 比例的上升，各水质指标的平均浓度均上升，且斜率由低变高。由图 8 可知，EIA 比例低于 9%时，水质可满足目标要求。然而，目前嘉兴市除公园用地外其他类型建设用地的 EIA 比例均超过 9%。

表 3 EIA≈0 时，SS，BOD_5 和 COD 与绿地比例的回归预测

水质指标	水质指标与绿地比例的拟合方程	相关系数
SS	$y=246.178\ 27-3.054\ 94\ x$	0.859 50
BOD_5	$y=7.551\ 68-0.051\ 39\ x$	0.979 27
COD	$y=42.126\ 88-0.393\ 89\ x$	0.839 92

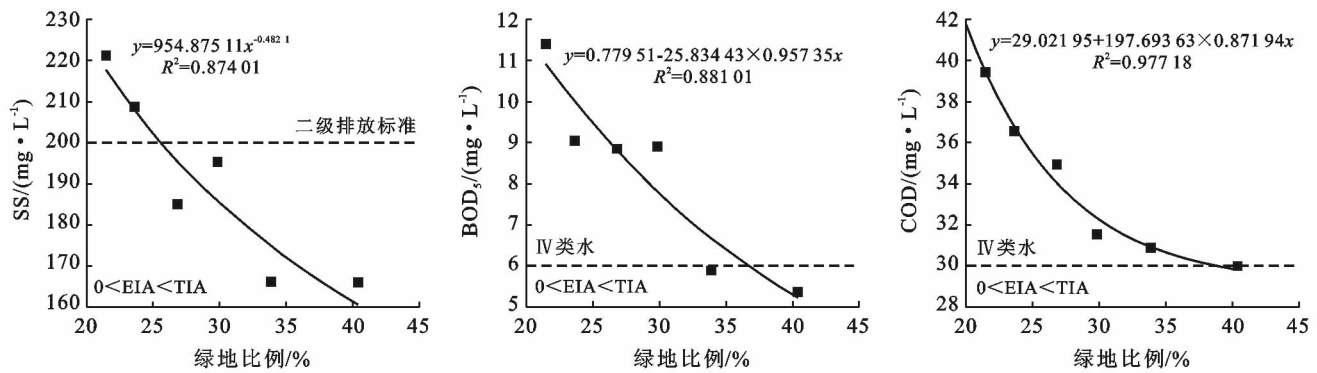


图 6 EIA＝0.04(TIA)$^{1.7}$ 时，SS，BOD_5 和 COD 与绿地比例的回归预测

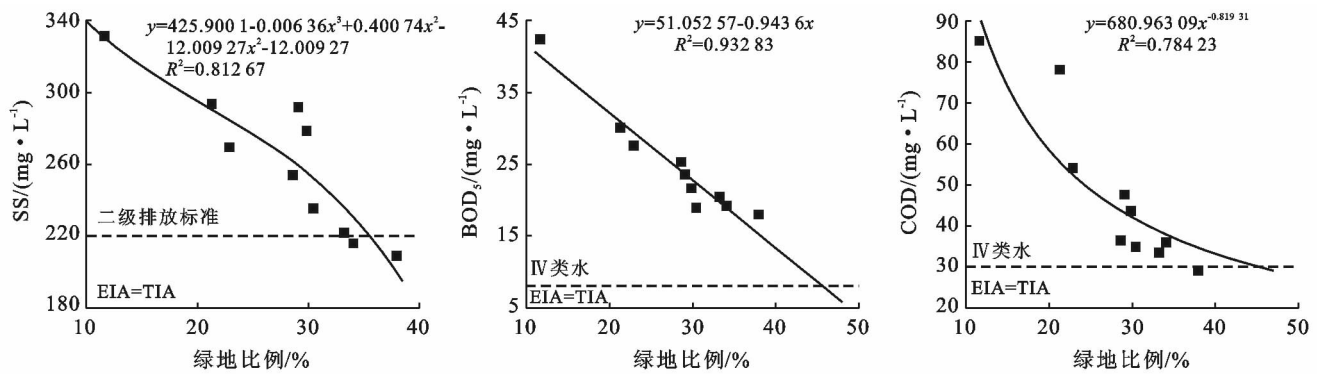


图 7 EIA＝TIA 时，SS，BOD_5 和 COD 与绿地比例的回归预测

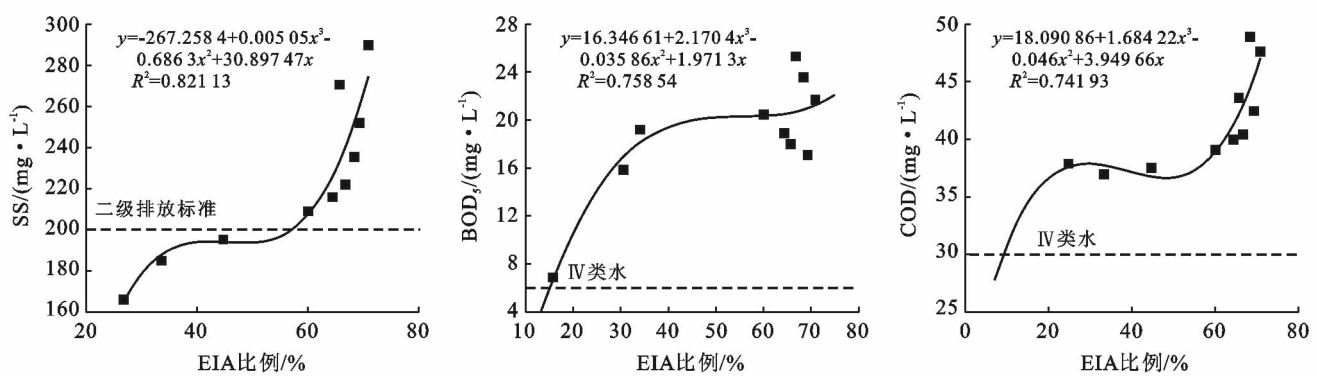


图 8 常规绿地比例下，SS，BOD_5 和 COD 与 EIA 比例的回归预测

由分析结果可知，在特定的海绵化程度下，当改变绿地和 EIA 比例使 COD 满足水质要求时，其余水质指标均在标准范围之内。因此，COD 是评价研究样本用地径流水质的关键性指标。

4　结 论

（1）基于冗余分析，定性地揭示了海绵化程度与径流水质的响应关系。影响各样本用地径流水质的海绵化指标不同；绿地、IIA、弱透水比例与水质指标呈负相关，EIA 比例与水质指标呈正相关；SS，BOD_5，COD 和 NH_3-N 与海绵化指标相关性较大。

（2）基于偏最小二乘回归分析，定量地探究出不同海绵化指标对各项水质指标的影响权重，筛选得到影响水质的关键指标为绿地比例和 EIA 比例，受海绵化程度影响的主要水质指标为 SS，BOD_5 和 COD。

（3）基于关键指标的 Origin 拟合分析，得出用地径流水质达到Ⅳ类及污水排放二级标准时绿地或 EIA 比例的响应阈值：①当 EIA≈0 时，绿地比例的阈值为 31%；②当 $EIA=0.04(TIA)^{1.7}$ 时，绿地比例的阈值为 38.5%；③当 EIA＝TIA 时，绿地比例的阈值为 47%；④在常规绿地比例（约为 35%）建设标准下，EIA 比例的阈值为 9%。

当前，《城市绿化规划建设指标的规定》中规定城市建设用地绿地比例应不低于 35%，其中，居住小区和公共建筑的绿地比例标准分别为 40%（新小区）、35%（旧小区和公共建筑）。由此可知，当 EIA≈0 时，则无需改变城市建设用地内绿地比例标准；当 $EIA=0.04(TIA)^{1.7}$ 时，建议已改造的居住小区和公共建筑的绿地比例标准均提高 3.5%；当 EIA＝TIA 时，建议未改造建设用地中居住小区和公共建筑的绿地比例分别提高 7%（新小区）和 12%（旧小区和公共建筑）；在常规绿地比例（约为 35%）建设标准下，可通过增加透水路面面积或将普通绿地改为下凹式绿地、雨水花园及雨落管等方式降低 EIA 比例。

致谢：嘉兴市规划设计研究院为本研究提供了详细的海绵城市建设施工图和降雨数据资料，特此致谢。

［参　考　文　献］

[1] Hamdi R, Termonia P, Baguis P. Effects of urbanization and climate change on surface runoff of the Brussels Capital Region: A case study using an urban soil-vegetation-atmosphere-transfer model[J]. International Journal of Climatology, 2011,31(13):1959-1974.

[2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 海绵城市建设技术指南：低影响开发雨水系统构建（试行）[M]. 北京：中国建筑工业出版社，2014.

[3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 海绵城市建设国家建筑标准设计体系[M]. 北京：中国建筑工业出版社，2016.

[4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50400-2016 建筑与小区雨水控制及利用工程技术规范[S]. 北京：光明日报出版社，2016.

[5] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB51222-2017 城镇内涝防治技术规范[S]. 北京：中国计划出版社，2017.

[6] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB51174-2017 城镇雨水调蓄工程技术规范[S]. 北京：中国计划出版社，2017.

[7] 吕伟娅，管益龙，张金戈. 绿色生态城区海绵城市建设规划设计思路探讨[J]. 中国园林，2015,31(6):16-20.

[8] 睢晋玲，刘淼，李春林，等. 海绵城市规划及景观生态学启示：以盘锦市辽东湾新区为例[J]. 应用生态学报，2017,28(3):975-982.

[9] 陈小龙，赵冬泉，盛政，等. 海绵城市规划系统的开发与应用[J]. 中国给水排水，2015,31(19):121-125.

[10] 李方正，胡楠，李雄，等. 海绵城市建设背景下的城市绿地系统规划响应研究[J]. 城市发展研究，2016,23(7):39-45.

[11] 车伍，张鹞，张伟，等. 初期雨水与径流总量控制的关系及其应用分析[J]. 中国给水排水，2016,32(6):9-14.

[12] Zhang Qianqian, Han Yongtao, Geng Yudong, et al. Research advances on the effect of the runoff intercepting and pollution reducing of green roof[J]. Environmental Science & Technology, 2016,39(1):74-78.

[13] Miller J D, Kim H, Kjeldsen T R, et al. Assessing the impact of urbanization on storm runoff in a peri-urban catchment using historical change in impervious cover [J]. Journal of Hydrology, 2014,515(7):59-70.

[14] 谢继锋，胡志新，徐挺，等. 合肥市不同下垫面降雨径流水质特征分析[J]. 中国环境科学，2012,32(6):1018-1025.

[15] 伊元荣，海米提·依米提，赵丽丽. 乌鲁木齐市不同下垫面雨水径流水质特性分析[J]. 水土保持研究，2010,17(2):247-251.

[16] Pennino M J, Mcdonald R I, Jaffe P R. Watershed-scale impacts of stormwater green infrastructure on hydrology, nutrient fluxes, and combined sewer overflows in the mid-Atlantic region[J]. Science of The Total Environment, 2016,565(9):1044-1053.

[17] Liu Wen, Chen Weiping, Peng Chi. Assessing the effectiveness of green infrastructures on urban flooding reduction: A community scale study[J]. Ecological Modelling,2014,291(1):6-14.

[18] 刘文，陈卫平，彭驰. 社区尺度绿色基础设施暴雨径流消减模拟研究[J]. 生态学报，2016,36(6):1686-1697.

[19] 胡爱兵，任心欣，丁年，等. 基于 SWMM 的深圳市某区域 LID 设施布局与优化[J]. 中国给水排水，2015,31

(21):96-100.

[20] 胡爱兵,任心欣,裴古中. 采用 SWMM 模拟 LID 市政道路的雨洪控制效果[J]. 中国给水排水,2015,31(23):130-133.

[21] Allison H. Roy, Shuster W D. Assessing impervious surface connectivity and applications for watershed management[J]. Jawra Journal of the American Water Resources Association, 2010,45(1):198-209.

[22] Nalinisahoo S, Sreeja P. Role of rainfall events and imperviousness parameters on urban runoff modelling[J]. Ish Journal of Hydraulic Engineering, 2013,19(3):329-334.

[23] Sohn W, Kim J H, Li M H. Low-impact development for impervious surface connectivity mitigation: assessment of directly connected impervious areas (DCIAs)[J]. Journal of Environmental Planning and Management, 2017,60(4):1-19.

[24] Lee J G, Heaney J P. Estimation of urban imperviousness and its impacts on storm water systems[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2003,129(5):419-426.

[25] Alley W M, Veenhuis J E. Effective impervious area in urban runoff modeling[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1983,109(2):313-319.

[26] Sutherland, Roger C. Methods for estimating the effective impervious area of urban watersheds[J]. Watershed Protection Techniques, 1995,2(1):282-284.

[27] Maloney C J, Rastogi S C. Significance test for Grubbs's estimators[J]. Biometrics, 1970,26(4):671-676.

[28] 吴亚刚,陈莹,陈望,等. 西安市某文教区典型下垫面径流污染特征[J]. 中国环境科学,2018,38(8):3104-3112.

[29] 赖江山. 生态学多元数据排序分析软件 Canoco5 介绍[J]. 生物多样性,2013,21(6):765-768.

[30] 王惠文. 偏最小二乘回归方法及其应用[M]. 北京:国防工业出版社,1999.

[31] 马壮,邸文静,王帅,等. 基于 Origin 7.0 软件非线性拟合白浆土胡敏酸吸附 Zn^{2+} 的热力学过程[J]. 中国农学通报,2014,30(32):159-164.

[32] 李琳琳,张依章,唐常源,等. 基于偏最小二乘模型的河流水质对土地利用的响应[J]. 环境科学,2017,38(4):1376-1383.

欢迎订阅 2020 年《中国农业科学》及 *Journal of Integrative Agriculture*(*JIA*)

《中国农业科学》是由农业农村部主管、中国农业科学院与中国农学会共同主办的综合性学术期刊,是中文核心期刊、中国科技核心期刊、中国精品科技期刊、CSCD Q_1 区期刊、中国权威学术期刊 A^+ 期刊、中国国际影响力优秀学术期刊,是了解中国农业相关领域科研进展的首选期刊。《中国农业科学》以研究论文、综述、简报等形式报道农牧业基础科学和应用基础科学最新成果。设有作物遗传育种·种质资源·分子遗传学;耕作栽培·生理生化·农业信息技术;植物保护;土壤肥料·节水灌溉·农业生态环境;园艺;食品科学与工程;畜牧·兽医·资源昆虫等栏目。读者对象为国内外农业科研院(所)、大专院校的科研、教学与管理人员。《中国农业科学》大 16 开,每月 1,16 日出版,国内外公开发行,定价 49.50 元,全年定价 1 188.00 元。国内统一连续出版物号:CN11-1328/S,国际标准连续出版物号:ISSN 0578-1752,邮发代号:2-138,国外代号:BM43。

《农业科学学报》(*Journal of Integrative Agriculture*, *JIA*)由农业农村部主管、中国农业科学院与中国农学会共同主办,是综合性英文学术期刊,月刊。*JIA* 前身为 2002 年创刊的《中国农业科学》英文版(*Agricultural Sciences in China*, ASC),2012 年更名为 *JIA*。*JIA* 2006 年起与 Elsevier 合作,全文数据在 ScienceDirect 平台面向世界发行;2009 年被 SCI 收录,最新影响因子为 1.337,位于 JCR 农业综合类 Q_2 区前列位次。*JIA* 是中国科技核心期刊;连续 6 年获得"中国最具国际影响力学术期刊"称号;2016 年入选中国科协"中国科技期刊国际影响力提升计划"及"中国科技期刊登峰行动计划"项目,是我国农业领域领衔学术期刊,并具有较高国际影响力。*JIA* 大 16 开,每月 20 日出版,国内外公开发行。每期 180 页,国内订价 80.00 元,全年 960.00 元。国内统一连续出版物号:CN 10-1039/S,国际标准连续出版物号:ISSN 2095-3119,邮发代号:2-851,国外代号:1591M。

《中国农业科学》《农业科学学报》全国各地邮局均可订阅,也可直接向编辑部订购。

邮编:100081; **地址**:北京中关村南大街 12 号《中国农业科学》编辑部

电话:010-82109808; **传真**:010-82106247; **联系人**:林鉴非

网址:www.ChinaAgriSci.com; E-mail:zgnykx@caas.cn