

舒 柳. 不同类型人工湿地净化水质季节变化分析 [J]. 江苏农业科学, 2015, 43(9): 384–388.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2015.09.122

不同类型人工湿地净化水质季节变化分析

舒 柳

(四川工程职业技术学院建筑系, 四川德阳 618000)

摘要:研究了垂直流、水平流、表面流和沟渠型 4 种不同类型人工湿地处理净化水质的季节变化。结果表明, 4 种人工湿地对总氮(TN)的平均去除率分别为 61.8%、58.6%、57.1% 和 41.3%; 对氨氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)的平均去除率分别为 62.8%、52.4%、56.0% 和 41.5%; 对总磷(TP)的平均去除率分别为 65.5%、59.5%、42.2% 和 38.8%; 对生物耗氧量(BOD_5)的平均去除率分别为 41.0%、32.1%、35.9% 和 30.5%; 对化学耗氧量(COD_{Cr})的平均去除率分别为 64.1%、58.9%、57.5% 和 49.8%; 对高锰酸钾指数的去除率分别为 51.1%、43.6%、47.6% 和 32.5%。综合比较可知, 人工湿地植被能有效促进湿地对污水的去除效果, 不同人工湿地去除效果存在一定的差异, 4 种不同类型人工湿地对 TN、TP、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 BOD_5 和高锰酸钾指数的去除效果较好, 对 COD_{Cr} 的去除效果较差, 以垂直流人工湿地去除效果最好, 水平流和表面流人工湿地次之, 沟渠型人工湿地去除效果最差。从出水水质稳定性来看, 垂直流人工湿地出水各项指标最稳定, 水平流和表面流次之, 沟渠型人工湿地最差; 4 种人工湿地对污水去除率随季节均呈“V”形变化, 基本表现为秋季 > 夏季 ≈ 冬季 > 春季。

关键词:人工湿地; 净化水质; 季节变化

中图分类号:S181.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2015)09-0384-04

人工湿地是由土壤、砾石、炉渣等按一定比例构成的选择性植入植被的污水处理生态系统^[1-2], 该系统基质、水生植物和微生物等通过一系列物理、化学和生物途径对污水进行高效去除, 现已广泛运用于污水处理并且取得了良好的环境净化效果和经济效益^[1-4]。人工湿地不仅具有同化吸收污染物的功能, 还有拦截、过滤污染物的作用^[1-2, 5-7], 不同类型人工湿地具有较大差别, 对污染物质的去除能力有较大的差异, 按结构可将其分为表面流、水平流、垂直流和沟渠型人工湿地, 其优缺点各不相同^[3, 6]。近几十年来, 关于人工湿地的研究大多局限于单一湿地类型, 较少进行不同类型人工湿地处理污水效果的比较, 不同类型人工湿地对富营养化水体处理效果的比较研究也鲜见报道。鉴于此, 针对 4 种类型人工湿地处理效果的比较研究, 探索不同湿地类型应用于富营养化水体处理效率之间的差异, 为恢复水生植物和自然湿地、构建人工湿地、净化生活污水、控制水体污染和富营养化提供理论依据和实践措施。

1 材料与方法

1.1 人工湿地设计与流程

人工废水配制方法: COD_{Cr} 368 mg/L, BOD_5 105 mg/L, TN 8.45 mg/L, TP 0.29 mg/L, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 5.72 mg/L; 高锰酸钾指数 11.30 mg/L; pH 值为 7.12 ~ 7.78。

试验区位于四川郫县安德镇园田村的庭院人工湿地, 人工湿地结构: 底部为集水区, 其上铺设尼龙网。垂直流和水平

流单元均设置为 50 m^2 (长 × 宽 × 深 = $25 \text{ m} \times 2.0 \text{ m} \times 0.8 \text{ m}$), 分 3 层依次填充基质, 底层大粒径砾石 (粒径 20 ~ 30 mm) 作为排水层, 厚度约为 25 cm, 中层选用当地中号炉渣 (粒径 15 ~ 25 mm), 厚度约为 25 cm, 上层选用当地小号炉渣和泥沙 (粒径 10 ~ 15 mm), 厚度约为 25 cm, 单元内种植鸢尾科鸢尾属的鸢尾 (*Iris pseudacorus*) 和香蒲 (*Typhalatifolia*), 种植密度为 3 ~ 7 棵/ m^2 ; 自由表面流单元为 40 m^2 (长 × 宽 × 深 = $20 \text{ m} \times 2.0 \text{ m} \times 0.4 \text{ m}$), 基质为土壤, 种植植物为鸢尾 (*Iris pseudacorus*) 和香蒲 (*Typhalatifolia*); 沟渠单元设置为 100 m^2 (长 × 宽 × 深 = $10 \text{ m} \times 10 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$) 的正方形, 并沿其对角线开设 2 条沟渠, 沟宽 0.2 m, 沟长 14.1 m, 平均深度 0.5 m。每个处理单元间用 1 m 宽的土埂隔开, 底部为集水区, 其上铺设尼龙网, 防止填料下漏, 沿对角线埋入直径为 15 mm 的 PVC 管, 使人工湿地中的循环水能流入 PVC 管, 便于试验样品采集。

2013 年 5 月 20 日先用微污染水对 4 种植物驯化 1 个月再进行净化能力试验, 选择株型大小、生物量基本一致的 4 种湿地植物, 栽于人工湿地沙子基质上, 植物栽上后, 加自来水至沙子基质饱和, 地下水培养 1 个月, 并保持其上 2 ~ 3 cm 薄水层, 稳定 15 d, 其间换水 3 次。2013 年 7 月 20 日将污水经配水池缓慢放入人工湿地 (水深 78 ~ 83 cm), 控制水流通过水管均匀流入人工湿地, 污水通过布设在人工湿地的布水管流入, 缓慢向下渗透, 放水 12 h 后, 停止注水, 水力负荷控制在 $0.75 \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。进水为上述配制的人工污水, 经过人工湿地处理后的水从底部 PVC 管排出。

1.2 样品的测定

结合人工湿地的运行情况和植被的生长状况, 不同季节取出水口水质, 实验室测定分析, 各指标的去除率 = (进水口

收稿日期: 2014-09-06

作者简介: 舒 柳 (1979—), 女, 四川广汉人, 硕士, 讲师, 研究方向为园林景观、园林植物学、生态保护。E-mail: shuliu1979@163.com。

值 - 出水口值) / 进水口值 $\times 100\%$ ^[1-2]。

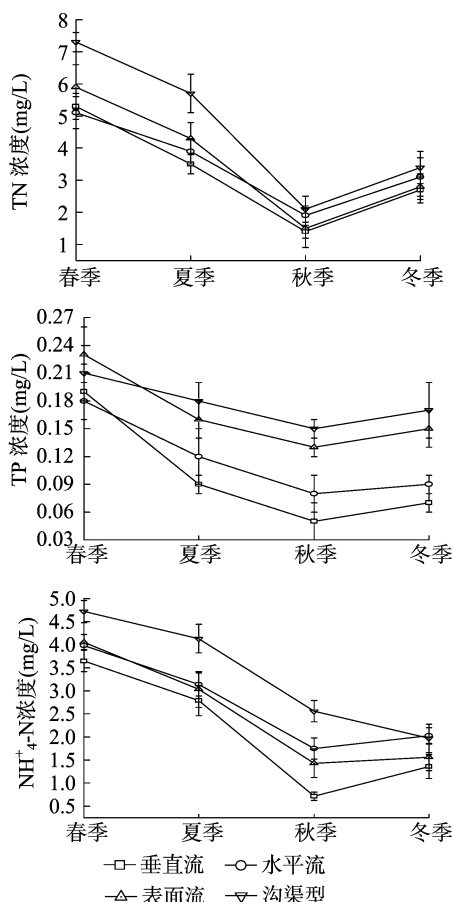
测定项目包括 TN、TP、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 BOD_5 、 COD_{Cr} 和高锰酸钾指数; BOD_5 采用稀释接种法; COD_{Cr} 采用重铬酸钾氧化法; $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 采用纳氏试剂分光光度法; TN 采用过硫酸钾 - 紫外分光光度法; TP 采用钼锑抗分光光度法; 参照文献 [7] 测定高锰酸盐指数。

1.3 数据处理与分析

所有数据采用 Excel 2003 统计, 以平均值 \pm 标准误差表示 ($\bar{x} \pm s$), 采用 SPSS 18.0 分别对数据进行单因素方差分析 (One-way ANOVA), 多重比较采用 LSD, 用 Origin 7.5 作图。

2 结果与分析

2.1 不同类型人工湿地 TN、TP 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 季节变化及去



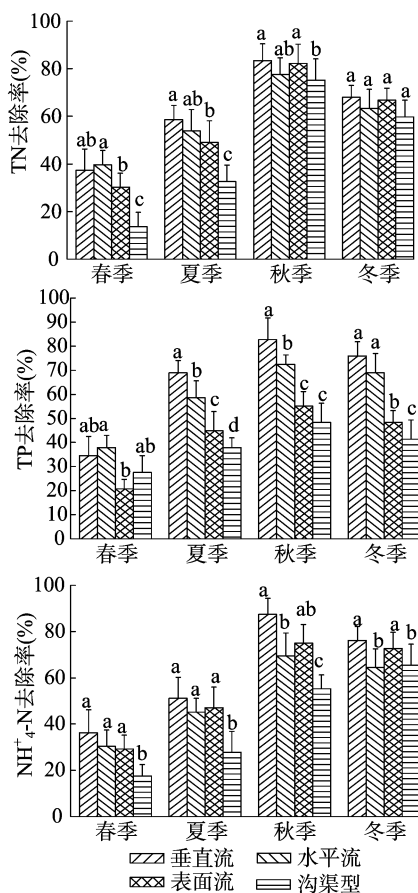
不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。下同
图1 不同类型人工湿地TN、TP和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 季节变化及去除率

2.2 不同类型人工湿地 BOD_5 、 COD_{Cr} 和高锰酸钾指数季节变化及去除率

图2为垂直流、水平流、表面流和沟渠型4种人工湿地不同季节 BOD_5 、 COD_{Cr} 和高锰酸钾指数出水浓度及去除率。4种人工湿地出水 BOD_5 、 COD_{Cr} 和高锰酸钾指数总体变化为春季最大, 夏季和秋季急剧下降, 冬季则有回升的趋势, 具体表现为春季 $>$ 夏季 $>$ 冬季 $>$ 秋季; 在出水浓度稳定性方面, 由春季到冬季垂直流人工湿地变化最小, 水平流和表面流次之, 沟渠型变化最大; 不同季节4种人工湿地对 BOD_5 、 COD_{Cr} 和高

除率

图1为垂直流、水平流、表面流和沟渠型4种人工湿地不同季节 TN、TP 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 出水浓度及去除率。4种人工湿地出水 TN、TP 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度总体变化为春季最高, 夏季和秋季降低, 冬季则有回升的趋势, 具体表现为春季 $>$ 夏季 $>$ 冬季 $>$ 秋季; 在出水浓度稳定性方面, 由春季到冬季垂直流人工湿地变化最小, 水平流和表面流次之, 沟渠型变化最大; 不同季节4种人工湿地对 TN、TP 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率呈现出明显的季节差异, 均表现为秋季 $>$ 冬季 $>$ 夏季 $>$ 春季, 其中春季明显低于其他季节, 相同季节以垂直流人工湿地处理效果最好, 水平流和表面流次之, 沟渠型最差, 基本表现为垂直流人工湿地 $>$ 水平流人工湿地 $>$ 表面流人工湿地 $>$ 沟渠型人工湿地。



锰酸钾指数去除率呈现出明显的季节差异, 基本表现为秋季 $>$ 夏季 \approx 冬季 $>$ 春季, 其中春季明显低于其他季节, 相同季节以垂直流人工湿地处理效果最好, 水平流和表面流次之, 沟渠型最差, 基本表现为垂直流人工湿地 $>$ 水平流人工湿地 $>$ 表面流人工湿地 $>$ 沟渠型人工湿地。

2.3 不同类型人工湿地对污水去除率比较

图3为4种人工湿地对污水去除效果的比较。4不同类型人工湿地对 TN、TP、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 BOD_5 、 COD_{Cr} 和高锰酸钾指数的去除效果存在一定的差异, 大致表现为垂直流人工湿

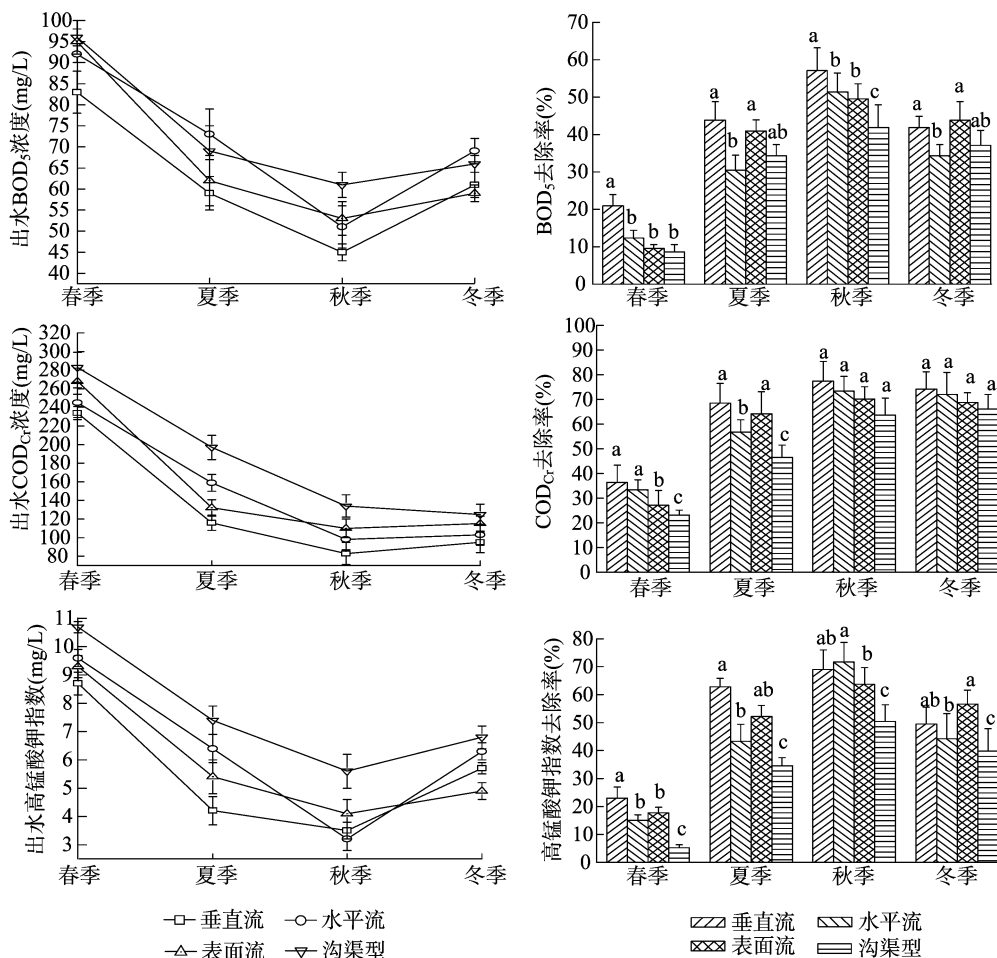


图2 不同类型人工湿地BOD₅、COD_{Cr}和高锰酸钾指数季节变化及去除率

地>水平流人工湿地>表面流人工湿地>沟渠型人工湿地; 4种人工湿地对TN的去除率分别为61.8%、58.6%、57.1%和41.3%,垂直流、水平流和表面流人工湿地对TN的去除效果差异不明显,但明显高于沟渠型人工湿地($P<0.05$);4种人工湿地对 NH_4^+-N 的去除率分别为62.8%、52.4%、56.0%和41.5%,垂直流、水平流和表面流人工湿地对TN的去除率均显著高于沟渠型人工湿地($P<0.05$),其中水平流和表面流人工湿地对TN的去除率差异并不显著;4种人工湿地对TP的去除率分别为65.5%、59.5%、42.2%和38.8%,垂直流和水平流人工湿地对TP的去除率差异不显著,但显著高于表面流和沟渠型人工湿地($P<0.05$);4种人工湿地对BOD₅的去除效果较差,分别为41.0%、32.1%、35.9%和30.5%,垂直流和表面流人工湿地对BOD₅的去除率差异不显著,但显著高于水平流和沟渠型人工湿地($P<0.05$);4种人工湿地对COD_{Cr}的去除率分别为64.1%、58.9%、57.5%和49.8%,垂直流、水平流和表面流人工湿地对COD_{Cr}的去除效果差异不明显,但明显高于沟渠型人工湿地($P<0.05$);4种人工湿地对高锰酸钾指数的去除率分别为51.1%、43.6%、47.6%和32.5%,垂直流和表面流人工湿地对高锰酸钾指数的去除率差异并不显著,但与水平流和沟渠型人工湿地达到显著差异水平($P<0.05$)。

3 讨论与结论

人工湿地净化水质机制较为复杂,本研究人工湿地基质为炉渣和泥沙,炉渣和泥沙能够避免土壤系统表面的短流,其多孔性扩大了表面积,有利于微生物的代谢活动,进而增强了人工湿地的去除效果^[7-11]。不同类型人工湿地净化污水效果存在一定差异,综合4种人工湿地净化污水效果(图1和图2),以垂直流人工湿地对污水中各项指标去除率最大,水平流和表面流人工湿地次之,沟渠型人工湿地去除效果最差,充分体现在对TN、TP、BOD₅、 NH_4^+-N 和高锰酸钾指数的去除,说明不同类型人工湿地对污染物的去除效果和机制不同。基质的吸附是人工湿地净化水质的主要过程^[1-2,6-7,12],由于沟渠型人工湿地土壤基质孔隙度低,水在基质表面流动,复氧能力差,为微生物生长提供载体的基质仅为表层部分,污染物随水流从基质表面漫流而过,吸附作用仅仅停留在基质表层,而垂直流和水平流的基质均为孔隙度较高的砾石,不仅复氧能力优于土壤基质,而且为微生物提供了大量的挂膜空间^[8-11],因此垂直流和水平流对氨氮的处理效果明显优于表面流和沟渠型人工湿地。

人工湿地主要通过植被的截流、过滤以及微生物的新陈代谢等活动化水质^[5-8]。其中对有机物的去除效果比较稳定;N循环较为复杂,主要通过氨的挥发、硝化、反硝化过程、

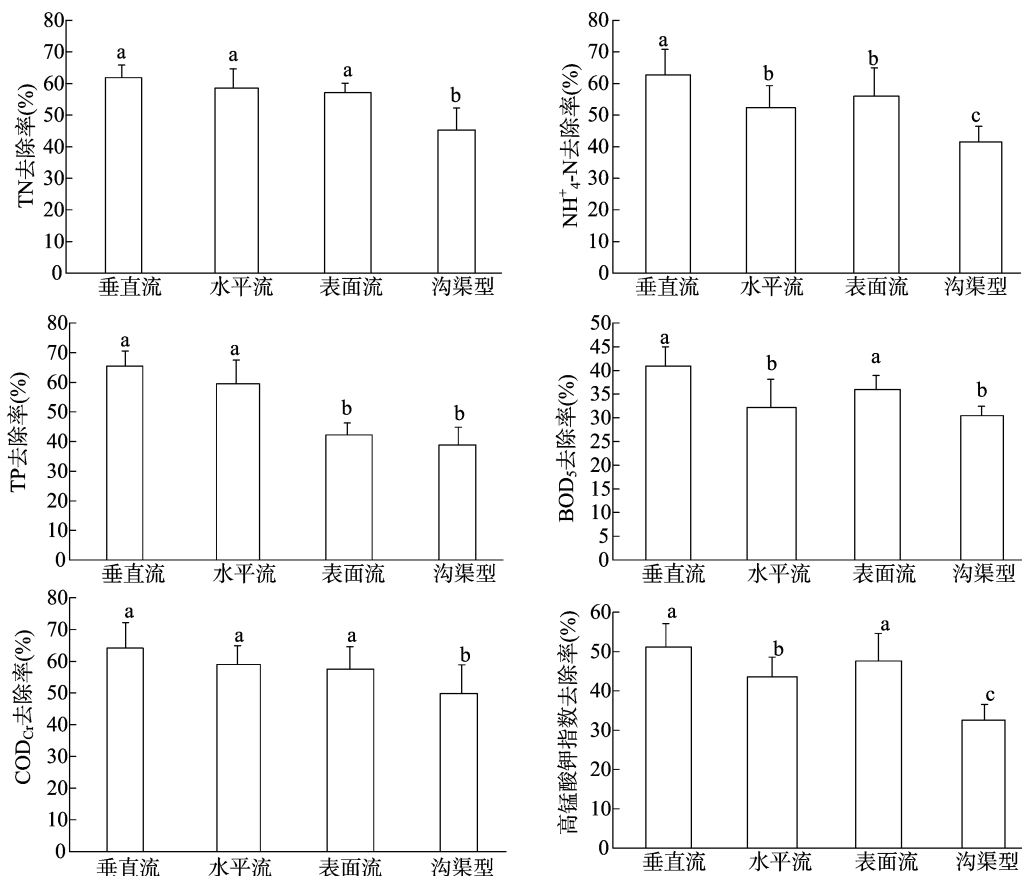


图3 不同类型人工湿地对污水去除率比较

介质的吸附、微生物固氮和氮的迁移转化得以去除;对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除主要是通过好氧微生物的降解;P 的去除主要以吸附为主,随泥沙颗粒在介质中被截留,通过植物吸收、物理化学作用及微生物降解 3 方面的作用去除,通过微生物的作用和植被的输氧作用形成了氧化态的根区,为好氧、兼性和厌氧微生物提供了各自适宜的生境,有利于微生物在人工湿地纵深扩展,从而促进了深层基质中微生物的生长和繁殖^[9-12];4 种人工湿地对高锰酸盐指数的去除效率不高,这是由于进水高锰酸盐指数的负荷低,可生化性不强所致。有研究表明,人工湿地中污水 pH 值 < 8.0 时,氨的挥发净化途径基本可以忽略^[8,10,13-14],经测得不同类型人工湿地出水 pH 值均小于 8.0,也即除了植物吸收和基质净化以外,基本上是硝化和反硝化途径起作用,因此,硝化和反硝化作用是人工湿地净化 N 的主要途径。

4 种人工湿地对污水去除率随季节均呈“V”字形变化,均表现为秋季 $>$ 夏季 \approx 冬季 $>$ 春季,即不同类型人工湿地对污水去除效果很大程度上依赖于植被及微生物的季节动态变化。湿地植被在春季处于萌芽阶段,生长较为缓慢,未与基质、土壤等形成完整的去污生态系统,此时人工湿地对污水的去除效果偏低,吸收作用还没有明显地表现出来,夏季植被迅速生长和繁殖,去除效果也更加明显,秋季各项生长指标均达到最大,有助于其根区微生物等的繁殖,这个时期对 TN、TP、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 BOD_5 、 COD_{Cr} 和高锰酸钾指数的去除效果最为明显,秋季以后,植被密度达到最大,缺乏有限的空间和资源,地

面部分开始枯黄、根系也逐渐溃烂,净化水质效果缓慢下降等,导致秋季以后其去除效果呈现下降趋势。此外,在去除各类污染物的过程中微生物是主要承担者,冬、春季节较低的温度影响了微生物酶活性^[1-2,8,12],从而导致人工湿地对各指标的去除效果降低。

人工湿地整合协调了基质-微生物-植物的净化系统,但基质吸附净化能力有一定限度^[9-12],尽管大量学者提出了基质强化净化能力的方法,随着时间的推移,基质的吸附净化容量达到饱和,人工湿地具有净化污染物能力的植被可以重复利用^[3-6,8-12],通过定量收获、刈割等方式可以延续其净化能力,并选择生物量较大、富集污染元素较强的植被是提高不同类型人工湿地净化水质能力的关键措施。

参考文献:

- [1] Adrados B, Sánchez O, Arias C A, et al. Microbial communities from different types of natural wastewater treatment systems: vertical and horizontal flow constructed wetlands and biofilters [J]. Water Research, 2014, 55: 304-312.
- [2] Vymazal J. Long-term performance of constructed wetlands with horizontal sub-surface flow: Ten case studies from the Czech Republic [J]. Ecological Engineering, 2011, 37(1): 54-63.
- [3] Chon K, Chang J S, Lee E, et al. Abundance of denitrifying genes coding for nitrate (*narG*), nitrite (*nirS*), and nitrous oxide (*nosZ*) reductases in estuarine versus wastewater effluent-fed constructed wetlands [J]. Ecological Engineering, 2011, 37(1): 64-69.

曾雨晴,潘洪义,周介铭,等. 基于空间自相关的人均耕地面积时空格局变化研究——以四川省为例[J]. 江苏农业科学,2015,43(9):388-391.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2015.09.123

基于空间自相关的人均耕地面积时空格局变化研究 ——以四川省为例

曾雨晴, 潘洪义, 周介铭, 马伟龙

(四川师范大学西南土地资源评价与监测教育部重点实验室/四川师范大学地理与资源科学学院, 四川成都 610066)

摘要:以地级市为空间尺度,利用 GIS 和 GeoDa 软件,采取探索性空间数据分析方法(ESDA)对 1998—2012 年四川省市域人均耕地面积的空间格局特征、变化及空间关联性进行分析。结果表明,1998—2012 年四川省市域人均耕地面积呈逐年下降趋势,其中雅安市、成都市降幅最大;人均耕地面积在空间关联性上呈空间正相关,相关系数较小,人均耕地面积高或低的市趋于相邻,且呈不同程度集聚,但集聚程度不高,总体空间差异逐年增大;由 Moran 散点图和 LISA 聚类图分析得出,落入 LL 和 HH 象限市域数量远大于 LH 和 HL 象限,显著性区域很少,反映出人均耕地面积空间分布的异质性,呈现空间离散分布格局。

关键词:空间自相关;数据分析;人均耕地面积;四川省;空间格局

中图分类号: F323.211 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2015)09-0388-04

我国是人口大国,耕地后备资源不足,人均耕地面积不足世界水平的一半。随着经济的快速发展,城市化进程不断加快,人口不断增长,优质耕地被占用为城市建设用地,我国的耕地资源更加紧缺。城市用地扩张和耕地保护间的矛盾引起国内外学者的广泛关注^[1]。许多学者运用经典统计分析方法对耕地面积变化进行不同视角的研究^[2-4],但是,由于空间依赖性的存在,该分析方法无法直接揭示与地理位置相关的

空间数据关联和依赖性。于是,许多学者引入空间统计分析方法^[5],有学者对城市人口分布、城市商业和住宅地价及城镇化水平进行了空间自相关分析^[6-8],也有学者将地理空间分析方法引入到区域 GDP 等空间分布进行研究^[9-10],如华娟等运用空间自相关分析方法并结合 GIS 技术,对人均粮食占有量空间差异进行分析^[11]。此外,越来越多的学者在地块用途转换、城镇建设用地分布及土地利用变化中进行多尺度空间自相关分析研究^[12-14]。

人均耕地面积与其他地区的经济现象一样,区域间的人均耕地面积不是独立存在,而是存在扩散效应或极化效应^[15],脱离空间角度来分析研究区域人均耕地面积的问题是不全面、不科学的。四川省作为一个农业大省,对其人均耕地面积区域分布特征及空间关联性有待深入分析。本研究以四川省地级市为单位,基于空间自相关分析方法对四川省市域人均耕地面积的时空格局演变进行分析,以期对相关土地管

收稿日期:2015-04-03

基金项目:国家自然科学基金(编号:41371120);四川省教育厅项目(编号:13ZB0153)。

作者简介:曾雨晴(1990—),女,四川绵竹人,硕士,主要从事土地利用与评价研究。E-mail:1170209811@qq.com。

通信作者:潘洪义,博士,副教授,主要从事土地利用与评价研究。E-mail:panhongyi80@163.com。

[4] Tanner C C, Sukias J P, Headley T R, et al. Constructed wetlands and denitrifying bioreactors for on-site and decentralised wastewater treatment: comparison of five alternative configurations[J]. Ecological Engineering, 2012, 42: 112-123.

[5] Fuchs V J, Mihelcic J R, Gierke J S. Life cycle assessment of vertical and horizontal flow constructed wetlands for wastewater treatment considering nitrogen and carbon greenhouse gas emissions[J]. Water Research, 2011, 45(5): 2073-2081.

[6] Ávila C, Reyes C, Bayona J M, et al. Emerging organic contaminant removal depending on primary treatment and operational strategy in horizontal subsurface flow constructed wetlands: Influence of redox[J]. Water Research, 2013, 47(1): 315-325.

[7] Huang L, Gao X, Liu M, et al. Correlation among soil microorganisms, soil enzyme activities, and removal rates of pollutants in three constructed wetlands purifying micro-polluted river water[J]. Ecological Engineering, 2012, 46: 98-106.

[8] 刘慎坦, 王国芳, 谢祥峰, 等. 不同基质对人工湿地脱氮效果和硝化及反硝化细菌分布的影响[J]. 东南大学学报:自然科学版, 2011, 41(2): 400-405.

[9] 李园芳. 人工湿地对景观水处理效果研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.

[10] 彭婉婷, 邹琳, 段维波, 等. 多种湿地植物组合对污水中氮和磷的去除效果[J]. 环境科学学报, 2012, 32(3): 612-617.

[11] 孙井梅, 李阳, 李志杰, 等. 垂直潜流人工湿地净化北方微污染水体试验研究[J]. 生态环境学报, 2012, 21(10): 1711-1716.

[12] 郭建, 栗志芬, 朱琼璐, 等. 生态塘-人工湿地-生态塘复合系统对城市河水中氮的去除效果[J]. 农业工程学报, 2011, 27(增刊2): 191-195.

[13] 王振, 刘超翔, 李鹏宇, 等. 废砖块作为人工湿地填料的除磷能力研究[J]. 环境科学, 2012, 33(12): 4373-4379.

[14] 刘波, 陈玉成, 王莉玮, 等. 4种人工湿地填料对磷的吸附特性分析[J]. 环境工程学报, 2010, 4(1): 44-48.