

洱海海西不同种植类型下农灌沟渠雨季水质变化特征与综合评价

谢坤, 罗元, 冯弋洋, 何秋平, 张克强, 沈仕洲, 王凤

引用本文:

谢坤, 罗元, 冯弋洋, 等. 洱海海西不同种植类型下农灌沟渠雨季水质变化特征与综合评价[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(10): 2387–2396.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0741>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

洱海农田生产/生活景观区交替分布及昼夜节律对丰水期沟渠水质影响

谢坤, 吴凡, 罗元, 张克强, 沈仕洲, 王淑茹, 王凤, 吴国云, 姚金玲

农业环境科学学报. 2018, 37(11): 2427–2433 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1135>

水生植物对不同氮磷水平养殖尾水的综合净化能力比较

冯优, 陈庆锋, 李金业, 郭贝贝, 刘婷, 李磊

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2397–2408 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0816>

土地利用驱动下洱海流域入湖河流水质时空分布规律

项颂, 万玲, 庞燕

农业环境科学学报. 2020, 39(1): 160–170 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0904>

水生植物对生态沟渠底泥磷吸附特性的影响

李红芳, 刘锋, 肖润林, 何洋, 王迪, 吴金水

农业环境科学学报. 2016, 35(1): 157–163 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016.01.021>

大伙房水库控制流域水质变化及污染源识别

韩爽, 夏春龙, 王永东, 蔡喜运

农业环境科学学报. 2020, 39(7): 1568–1575 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0234>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

谢坤, 罗元, 冯弋洋, 等. 洱海海西不同种植类型下农灌沟渠雨季水质变化特征与综合评价[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(10): 2387–2396.

XIE Kun, LUO Yuan, FENG Yi-yang, et al. Comprehensive evaluation of water quality changes in agricultural irrigation ditches in the rainy season under different planting patterns in the west of Erhai, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(10): 2387–2396.



开放科学 OSID

洱海海西不同种植类型下农灌沟渠雨季水质变化特征与综合评价

谢坤^{1,2}, 罗元^{1,2}, 冯弋洋^{1,2,3}, 何秋平^{1,2,4}, 张克强^{1,2}, 沈仕洲^{1,2}, 王凤^{1,2*}

(1. 农业农村部环境保护科研监测所, 天津 300191; 2. 农业农村部大理农业环境科学观测实验站, 云南 大理 671004; 3. 云南农业大学资源与环境学院, 昆明 650201; 4. 新疆农业大学草业与环境科学学院, 乌鲁木齐 830052)

摘要:为揭示洱海海西种植区不同种植类型对农灌沟渠雨季水质的综合影响及N、P等贡献率,选取烟草、苗木、蔬菜和水稻4种植植区内农灌沟渠为研究对象,通过分析COD、TN、TP及 NH_4^+-N 浓度变化特征及种植类型贡献率,同时采用综合平均污染指数法和“中心化”灰色模式识别水质评价模型对沟渠水质进行综合评价。结果表明:4种植植类型中蔬菜和烟草种植分别对沟渠径流中TN和TP流失贡献最大,沟渠径流中 NO_3^--N 是TN最主要形态,占比为60.43%~81.35%,烟草种植区沟渠径流中DTP为TP主要形态,占比为74.16%~77.95%;综合平均污染指数法表明沟渠中TN和COD是水质类别变化主要影响因子,水质影响占比分别为14.06%~56.95%和20.03%~37.19%;灰色模式识别模型分析发现单位种植面积指数差($\Delta\text{GC}\cdot\text{hm}^{-2}$)贡献依次是蔬菜(0.057 2)>烟草(0.015 5)>苗木(0.014 1)>水稻(0.000 2),种植类型对沟渠水质影响依次降低。

关键词:洱海; 种植类型; 农灌沟渠; 污染特征; 综合评价

中图分类号: X824 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2020)10-2387-10 doi:10.11654/jaes.2020-0741

Comprehensive evaluation of water quality changes in agricultural irrigation ditches in the rainy season under different planting patterns in the west of Erhai, China

XIE Kun^{1,2}, LUO Yuan^{1,2}, FENG Yi-yang^{1,2,3}, HE Qiu-ping^{1,2,4}, ZHANG Ke-qiang^{1,2}, SHEN Shi-zhou^{1,2}, WANG Feng^{1,2*}

(1. Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300191, China; 2. Dali Agro-Environmental Science Station, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Dali 671004, China; 3. College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 4. College of Grassland and Environment Science, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

Abstract: The purpose of this study is to reveal the comprehensive influence of different planting patterns on the water quality and rate of pollutant contribution by irrigation ditches in the rainy season in the west of Erhai Basin. Agricultural irrigation ditches were selected in four areas planted with tobacco, seedlings, vegetables, and rice. By analyzing the changes in COD, TN, TP, and NH_4^+-N concentrations, the comprehensive average pollution index method and “centralized” gray pattern recognition model were used to comprehensively evaluate the water quality of the ditch. The results showed that vegetable and tobacco planting had the largest contribution to TN and TP loss, respectively, in ditch runoff. NO_3^--N was the main form of TN and accounted for 60.43%~81.35% in the ditch runoff water. DTP was the main form of TP and accounted for 74.16%~77.95% in ditch runoff. The results of the comprehensive average pollution index method

收稿日期: 2020-06-30 录用日期: 2020-09-11

作者简介: 谢坤(1994—),男,四川广安人,硕士,科研助理,从事农业面源污染防治研究。E-mail: 1839793331@qq.com

*通信作者: 王凤 E-mail: wangfeng_530@163.com

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0800103); 948项目(2016-X53); 农业部财政项目

Project supported: National Key R&D Program of China(2017YFD0800103); 984 Project(2016-X53); Finance Project of Ministry of Agriculture

showed that TN and COD were the main factors affecting the water body; the pollution ratio was 14.06%~56.95% and 20.03%~37.19% respectively. The results of the gray pattern recognition model analysis showed that the pollution index per hectare planting area ($\Delta GC \cdot \text{hm}^{-2}$) was vegetable field(0.057 2) > tobacco field(0.015 5) > seedling field(0.014 1) > rice paddy(0.000 2).

Keywords: Erhai; planting pattern; farm irrigation ditches; pollution characteristics; comprehensive evaluation

水体富营养化已成为我国最严重的水污染问题之一^[1],湖泊和河流等地表水体生态环境受到严重破坏^[2],而农业面源污染是导致水体富营养化的主要因素之一^[3],其中农田种植类型的变化影响着土地の利用强度、化肥农药的施用水平以及水土流失情况,从而影响农田土壤N、P等污染物的产生、输出、迁移和转化,导致区域农业面源污染不断加剧,使得水体水质发生不同程度的变化。洱海作为云贵高原第二大淡水湖泊,目前水质总体稳定在Ⅱ至Ⅲ类,已渡过中营养化向富营养化转变阶段,正处于早期富营养化^[4]。农业面源污染成为洱海富营养化的主要因素之一^[5],而流域耕地N、P流失已成为农业面源污染主要来源^[6],占污染总量的70%左右^[7]。近年来,不同学者从流域土地利用类型、季节变化特征及时间变化上对流域农业面源污染变化特征进行了深入研究^[8-10],发现不同土地利用下,耕地面积的增加,导致流域地表径流中N、P浓度显著增加;相对于耕地面积,林地面积的增加,流域地表径流中N、P浓度则相应降低,同时旱季入湖河流水质对土地利用响应关系强于雨季。由于流域种植过程中较为单一种植制度及不同轮作模式导致农田N、P随地表径流不同程度流失^[11],在流域径流中N、P浓度变化同流域种植类型有明显的相关性^[12]。研究显示,洱海北部不同轮作模式中,大蒜-水稻轮作模式下农田N、P流失风险最高^[11],同时单一模式种植下,流域蔬菜种植N、P流失量远大于其余种植类型^[13]。可知,流域农业面源污染物中N、P等的输出与流域土地利用、作物种植类型及区域的空间搭配密切相关。

农田灌排沟渠在自然界中作为一种特殊的生态系统,不仅通过自身的物理、化学与微生物作用吸收和转化周围环境输入的N、P等元素^[3],而且作为农田和上下游水体之间的联系纽带,也是下游水体N、P等物质来源的重要通道^[13]。洱海海西是流域农业种植的主要集中区域之一,在此区域内耕地面积占农业用地的19.16%~59.77%^[10],为方便灌溉,依托地形变化及苍山水源等因素,海西种植区修建了大量农灌沟渠,满足主要农业种植区农田灌溉用水需求,同时降

雨冲刷农田导致地表径流中N、P等营养物质进入沟渠水体。流域农灌沟渠是种植区农田和洱海之间的连接纽带,是向洱海水体输送N、P等物质的重要通道^[14],其水质状况受周边土地利用与种植类型影响极大。目前,对洱海流域农田灌排沟渠的研究多集中于对农田径流N、P的削减效应^[3],以及农村和农田交替分布下农田沟渠径流N、P的变化特征^[15],但对不同种植类型下农田沟渠径流中N、P等主要污染物浓度变化、水质影响占比及综合水质类别变化还鲜有研究。

本研究以洱海海西苗木、蔬菜、烟草和水稻种植区农灌沟渠为对象,在沟渠径流N、P及COD浓度变化特征研究基础上,进一步探究沟渠径流主要污染物类别,基于综合平均污染指数^[16]和种植类型贡献率^[13]明确径流中不同水质影响因素占比变化与农田灌排、耕作及其他生产事件造成的沟渠径流N、P和COD浓度变化的影响程度,同时以“中心化”灰色模式识别水质评价模型^[15]对农灌沟渠水质综合分析评价,探讨不同种植类型对沟渠径流污染贡献,以期为流域合理优化不同种植空间格局提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区域位于云南省大理州大理市214国道至环海西路之间种植区,分布于喜洲镇、大理镇和银桥镇区域。区域属于典型的高原低纬度西南季风气候区,平均海拔1 970~2 049 m,年平均气温13~20℃,年平均降雨量约1 000~1 500 mm,其主要降雨期(雨季)集中于每年的5—10月,降水量占全年的85%~96%,降水高峰期主要集中于7—8月,雨季月平均降雨量约147.85 mm^[17]。研究种植区为单一种植类型集中区,沟渠来水主要为苍山汇水,沿“苍山-洱海”流经种植区,沟渠功能以农田灌排为主。沟渠径流入水口同为上游其他土地利用类型出水口,在降雨、灌溉及其他生产活动时,沟渠时刻同农田进行着地表水交换。不同种植类型下沟渠种类、特征及覆盖汇水面积见表1。沟渠因底泥存在,沟渠内植被生长良好,植被均以当地常见优势草本植物双穗雀稗(*Paspalum*

distichum L.)、长芒稗(*Echinochloa caudata* Roshev.)、假稻[*Leersia japonica* (Makino) Honda.]、空心莲子草(*Alternan-thera philoxeroides*)和狗牙根(*Cynodon dactylon*)等为主。监测区农田土壤类型主要为潴育型水稻土(俗称鸡粪土),土壤肥沃^[18]。监测区主要种植作物分别为蔬菜、水稻、苗木和烟草等,种植模式主要为常年生苗木、旱作蔬菜、蚕豆-烟草轮作和蚕豆-水稻轮作等,作物种植施肥情况见表2。

1.2 数据来源

水质分析数据来源于2018年6—10月农灌沟渠水质指标监测所得,研究区域沟渠全长共布设进出水2个取样断面,不同种植类型农灌沟渠共设置8个取样断面。取样频率为1周1次,如遇下雨,则在降雨当天及1 d以后增加取样频率,采样时间控制在14:00—16:00之间,共取样24批次。水质指标选取溶解氧(DO)、化学需氧量(COD)、总氮(TN)、总磷(TP)、铵态氮(NH₄⁺-N)、硝态氮(NO₃⁻-N)、可溶性总磷(DTP)和颗粒态磷(PP)。

1.3 水质分析方法及指标贡献率

水样中TN采用碱性过硫酸钾分光光度法,NH₄⁺-N和NO₃⁻-N分别采用纳氏试剂比色法和酚二磺酸分光光度法,TP采用钼酸铵分光光度法,DTP浓度同样采用0.45 μm微孔滤膜过滤预处理,测定方法同TP,PP浓度通过TP与DTP计算而来,COD浓度采用酸性重铬酸盐指数法^[19],DO浓度每次采样时通过便携式溶氧仪[YSI 550A,美国赛莱默(Yylem)公司]进行现场测定。

种植类型对沟渠径流中不同形态N、P等贡献率为沟渠径流流经某一种植区时,由于灌排、耕作及其他生产事件引起的水体中不同形态N、P浓度变化量与沟渠出水中不同形态N、P浓度总量之比^[13],其计算公式为:

$$y=\frac{a_1-a_2}{a_1}\times100\%$$
 (1)

式中:y为种植区对沟渠径流N、P等浓度贡献率,%;

a₁为种植区沟渠径流出水浓度,mg·L⁻¹;a₂为种植区沟渠径流入水浓度,mg·L⁻¹。

1.4 综合平均污染指数法^[16]

通过综合平均污染指数法可获得沟渠水质影响因素综合权重,用以确定沟渠水质中影响因素占比及其权重,便于分析水质变化状况。计算公式如下:

$$P_k=\sum_{j=1}^n P_{jk}=\sum_{j=1}^n \frac{C_{jk}}{C_{k0}}$$
$$K_j(k)=\frac{P_{jk}}{P_i}\times100\%$$
$$W_j(k)=\frac{P_{jk}}{P_k}$$
 (2)

式中:P_k为k评价因子的综合指数;P_{jk}为j断面k项污染因子的污染指数;C_{jk}为j断面k项污染因子的实测值;C_{k0}为k项污染因子评价标准的平均值;n为监测断面个数;W_j(k)为j项污染物的权重值;K_j(k)为j项污染物贡献率。K_j(k)越大表明该污染因子的贡献率越大。

1.5 “中心化”灰色模式识别水质评价模型^[15]

“中心化”灰色模式识别水质评价模型针对性地考虑了以区间形式存在的水质评价标准,相比于临界值直接判断水质级别归属更加客观,同时采用“中心化”方法进行水质数据无量纲化,使计算结果的差异性体现得更加明显,且具有明确的物理意义。

1.5.1 比较数列与参考数列的确定

水质分级标准数列即比较数列,设水质分级标准共分m级,地表水水质分级标准一共为V级标准,评价

表2 监测期内当季作物的肥料投入量
Table 2 Fertilization rates of the crops during the monitoring period

作物种植类型 Crop planting type	施肥量折纯 Net input/(kg·hm ⁻²)		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
蔬菜 Vegetable	1 140.00	150.00	300.00
苗木 Nursery stock	90.00	90.00	90.00
烟草 Tobacco	118.65	107.10	25.50
水稻 Paddy rice	69.00	48.00	45.00

表1 灌排沟渠采样位置、特征及覆盖汇水面积
Table 1 Ditch sampling location, characteristics and covered water area

作物种植类型 Crop planting type	沟渠类型 Ditch type	监测灌排沟渠特征 Ditch characteristic					覆盖汇水面积 Covered water area/hm ²
		长度 Length/m	宽度 Width/m	深度 Depth/m	底泥深 Sediment thickness/m	坡度 Slope/(°)	
蔬菜 Vegetable	自然生态沟渠 Natural ecological ditch	1 334.75	0.40	0.20	0.005~0.03	2.29	15.56
苗木 Nursery stock	自然生态沟渠 Natural ecological ditch	335.15	0.50	0.18	0.003~0.02	0.86	4.35
烟草 Tobacco	混凝土沟渠 Concrete ditch	662.65	0.70	0.75	0.01~0.03	0.63	6.71
水稻 Paddy rice	混凝土沟渠 Concrete ditch	340.08	0.80	0.94	0.01~0.20	0.17	5.68

因子有 n 个,得到各级水体分级标准的比较数列 $\{x_i(k)\}$:

$$\begin{aligned} x_i(k) &= \{x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(n)\}, \\ k &= 1, 2, \dots, n; \quad i = 1, 2, \dots, m \end{aligned} \quad (3)$$

所有断面监测值作为参考数列,设监测断面共有 h 组,每个点选取评价因子相同,共有 n 个,则得到参考数列 $\{x_j(k)\}$:

$$\begin{aligned} x_j(k) &= \{x_j(1), x_j(2), \dots, x_j(n)\}, \\ k &= 1, 2, \dots, n; \quad j = 1, 2, \dots, h \end{aligned} \quad (4)$$

式中: $x_i(k)$ 为比较数列中的某一元素; $x_j(k)$ 为参考数列中的某一元素。

1.5.2 数据的无量纲化

评价模型采用“中心化”方法对监测数据与标准数据进行无量纲化:

$$\begin{aligned} \bar{x}_j(k) &= \frac{x_j^{(0)}(k) - \frac{1}{h} \sum_{j=1}^h x_j^{(0)}(k)}{\sigma_j(k)} \\ j &= 1, 2, \dots, h; \quad k = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (5)$$

式中: $\bar{x}_j(k)$ 为第 j 断面第 k 项指标的无量纲化结果; $x_j^{(0)}(k)$ 为研究区第 j 断面第 k 项指标的实测浓度均值; $\sigma_j(k)$ 为 $x_j^{(0)}(k)$ 的样本均方差。

$$\begin{aligned} \bar{x}_i(k) &= \frac{x_i^{(0)}(k) - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_i^{(0)}(k)}{\sigma_i(k)} \\ i &= 1, 2, \dots, m; \quad k = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (6)$$

式中: $\bar{x}_i(k)$ 为第 i 类水第 k 项指标的无量纲化结果; $x_i^{(0)}(k)$ 为研究区第 i 类水第 k 项指标的浓度标准值; $\sigma_i(k)$ 为 $x_i^{(0)}(k)$ 的样本均方差。

1.5.3 绝对差的计算

由于评价标准并非一个数值,而是一个区间。因此,评价模型采用一种基于点到区间距离的关联系数公式,定义绝对差为:

$$\Delta_{ij}(k) = \begin{cases} \bar{x}_{i(\min)}(k) - \bar{x}_j(k) & \bar{x}_j(k) < \bar{x}_{i(\min)}(k) \\ 0 & \bar{x}_{i(\min)}(k) < \bar{x}_j(k) < \bar{x}_{i(\max)}(k) \\ \bar{x}_j(k) - \bar{x}_{i(\max)}(k) & \bar{x}_j(k) > \bar{x}_{i(\max)}(k) \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\bar{x}_j(k)$ 为第 j 断面第 k 项指标的无量纲化结果; $\bar{x}_{i(\min)}(k)$ 为第 i 类水第 k 项指标水质标准无量纲化结果的最小值; $\bar{x}_{i(\max)}(k)$ 为第 i 类水第 k 项指标水质标准无量纲化结果的最大值; $\Delta_{ij}(k)$ 为点到区间距离的绝对差值。

1.5.4 关联系数

基于 1.4.3 得到的矩阵, $x_i(k)$ 对 $x_j(k)$ 在第 k 点的关联系数定义为:

$$\zeta_{ij}(k) = \frac{\min \Delta_{ij}(k) + \rho \max \Delta_{ij}(k)}{\Delta_{ij}(k) + \rho \max \Delta_{ij}(k)} \quad (8)$$

式中: ρ 为分辨系数, $\rho \in (0, 1)$, 其取值不同,分辨能力不同,通常其值愈大,分辨性愈强,但是对于整个水质类别判定趋势无过多影响。以往传统灰色关联分析中,分辨系数(ρ)取值一般为 0.5,故本研究中 ρ 取值为 0.5。

1.5.5 关联度计算

通过关联系数与指标权重即可求得样本参考数列与比较数列中各向量间的关联度。计算公式为:

$$\gamma_{ij} = \sum_{k=1}^m W_j(k) \zeta_{ij}(k) \quad (9)$$

式中: γ_{ij} 表示断面 j 水体样本与水质标准 i 类型之间的关联度; $W_j(k)$ 表示断面 j 第 k 项评价指标的综合权重。

1.5.6 求灰色隶属度

隶属度 U_{ij} 表示第 j 个断面水质样本隶属于第 i 类水的灰色隶属度,相应得到全部水质样本对于不同类别水质的隶属度。

$$U_{ij} = 1 / \left[\sum_{q=1}^i \left(\frac{1 - \gamma_{ij}}{1 - \gamma_{iq}} \right)^2 \right] \quad (10)$$

式中: γ_{iq} 表示断面 j 水体样本与水质标准 q 类型之间的关联度, $q = 1, 2, \dots, i$ 。

1.5.7 灰色综合指数(GC)计算

灰色综合指数可更加细化了解各监测断面及沟渠水质受污染情况,通过各监测点对应水质类别 t 与其相应的隶属度 U_{ij} 加权平均,计算公式为:

$$GC = \sum_{i=1}^n t \cdot U_{ij} \quad (11)$$

式中: U_{ij} 为第 j 个断面水质样本第 i 类水最优灰色隶属度; t 为各监测点对应水质类别, $t = 1, 2, \dots, n$ 。

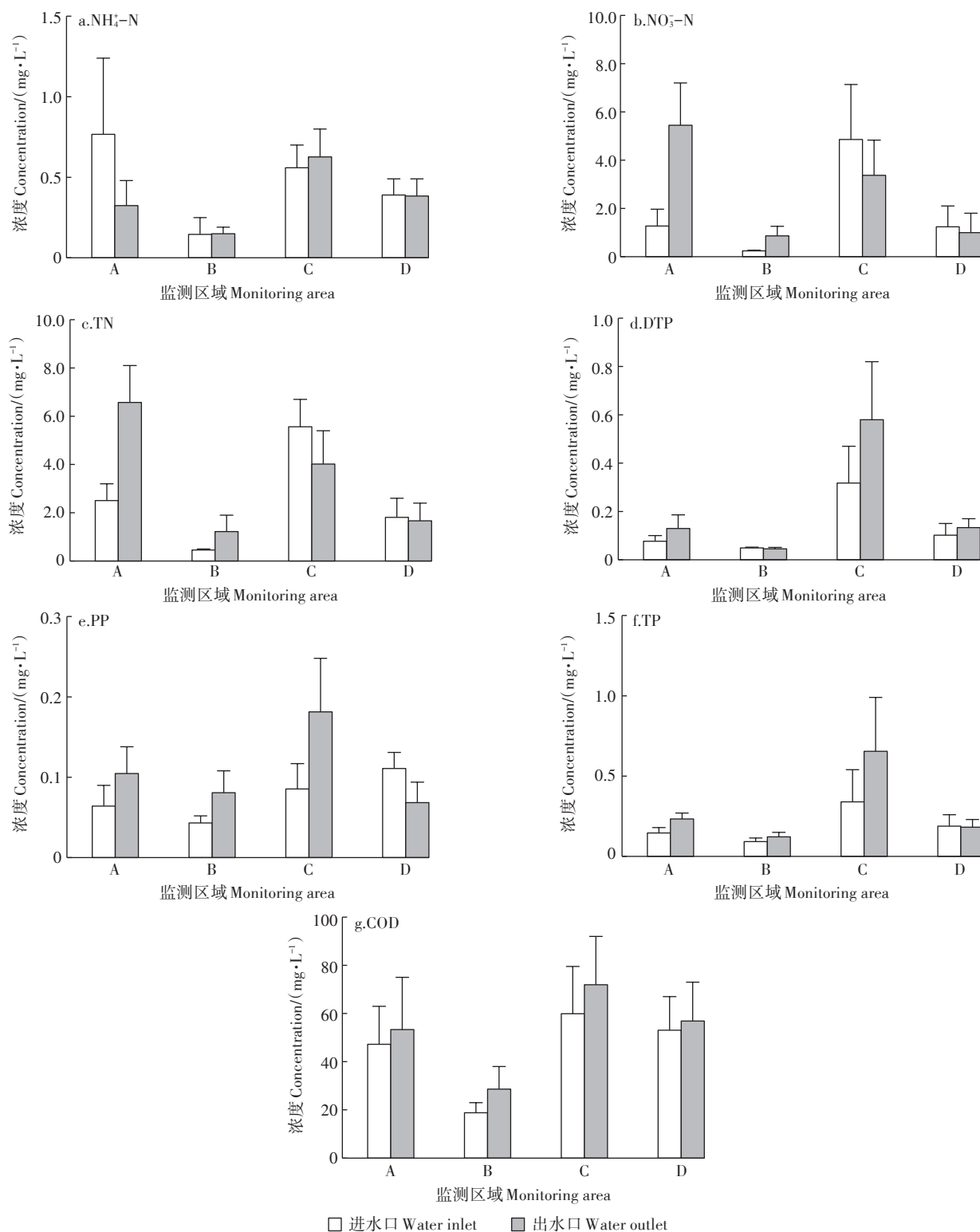
2 结果与分析

2.1 沟渠雨季水质指标动态变化特征

洱海海西种植区农灌沟渠进出水 N、P 和 COD 动态变化见图 1。不同种植区沟渠径流进出水质 N 素形态浓度变化,通过图 1c 和图 1b 可知,蔬菜和苗木种植区沟渠进出水中 TN 和 NO_3^- -N 浓度呈现出水浓度增加,烟草和水稻种植区沟渠出水浓度减小的趋势,蔬菜和苗木种植区沟渠出水相比于进水浓度分别增加 162.08% 和 169.67%。相比于沟渠中 TN 和 NO_3^- -N 的变化,蔬菜和烟草种植区沟渠径流中 NH_4^+ -N 变化表现出相反变化趋势,且苗木和水稻种植区沟渠进出水无明显变化(图 1a)。不同种植类型区沟渠中 NO_3^- -N 是水体中 N 素主要形态,沟渠径流中 NO_3^- -N/TN 平

均分别为71.30%、60.43%、81.35%和63.26%。通过图1d、图1e和图1f可看出,沟渠进出水中水质P素浓

度除水稻种植区外,其余种植类型区沟渠出水中TP和PP浓度都大于进水,苗木和水稻种植区沟渠水体



图横坐标A、B、C和D分别表示蔬菜、苗木、烟草和水稻种植类型区域

The abscissas A, B, C and D in the figure indicate the vegetable, nursery, tobacco, and paddy planting type area, respectively

图1 径流污染物变化特征

Figure 1 Runoff pollutant change characteristics

中DTP变化与TP和PP相反,烟草种植区DTP是沟渠水体中P的主要存在形式,占比为74.16%~77.95%,同时苗木和水稻种植区沟渠径流进出水中P的主要形态都发生了变化,蔬菜种植区沟渠径流中DTP和PP在TP占比未发生明显变化。不同种植类型影响下沟渠径流出水中COD浓度都大于进水,其中烟草种植区沟渠径流出水COD浓度最大,为71.94 mg·L⁻¹(图1g)。

2.2 种植类型对沟渠水体污染物贡献率及水质影响占比

根据2018年6—10月不同种植区农灌沟渠进出水质监测数据,各水质影响因素占比与种植类型污染贡献率见表3。不同种植区沟渠径流水质影响因素占比总体排序为TN(COD)>COD(TN)>TP>NH₄⁺-N,在不同种植区沟渠中TN和COD均是径流水质重要影响因素,且在蔬菜种植区沟渠进出水水质TN和COD占比变化最大分别为35.04%~56.95%和20.03%~28.71%。蔬菜和苗木种植区沟渠径流出水TN影响都大于进水,且对沟渠水质污染贡献率分别为71.97%和62.89%,大于烟草和水稻种植区。沟渠进出水中烟草种植区TP影响占比和污染贡献率(57.95%)为最大,其他种植区变化较小,水稻因其种植环境的不同(水田),使得其贡献率最低,为-5.18%。COD和NH₄⁺-N影响占比仅在蔬菜种植区沟渠有着出水小于进水这一变化,由沟渠和种植特殊性共同决定,蔬菜种植区农田对沟渠NH₄⁺-N贡献率更是低至-57.88%。

2.3 “中心化”灰色模式识别模型水质综合评价

水质评价模型的计算见表4。不同种植类型农灌沟渠出水水质综合类别和水质灰色综合指数(GC)变化,除苗木种植区沟渠出水综合水质为Ⅲ类,蔬菜、水稻和烟草这3种植类型种植区沟渠出水综合水质以Ⅳ类

和Ⅴ类为主,4种植类型种植区沟渠径流进出水水质类别变化较大的分别是种植蔬菜(进水Ⅳ类,出水Ⅴ类)和苗木(进水Ⅱ类,出水Ⅲ类),但从沟渠径流单位汇水面积指数差($\Delta GC \cdot \text{hm}^{-2}$)的不同变化,可知不同种植区沟渠径流 $\Delta GC \cdot \text{hm}^{-2}$ 值大小排序为0.057 2(蔬菜)>0.015 5(烟草)>0.014 1(苗木)>0.000 2(水稻),种植区沟渠水质 $\Delta GC \cdot \text{hm}^{-2}$ 值最大和最小分别为蔬菜和水稻,说明蔬菜种植过程中农田N、P等排放对沟渠径流水质影响最大,其次是烟草和苗木种植,水稻种植污染物排放对沟渠径流水质影响最小。

3 讨论

3.1 洱海流域农灌沟渠雨季水质指标动态变化特征

流域种植区沟渠径流在不同种植类型影响下,导致沟渠进出水质N、P以及COD发生变化,其中蔬菜和苗木种植区沟渠出水TN和NO₃-N浓度大于进水,水稻和烟草种植区沟渠出水浓度则小于进水,这一现象与农田不同种植作物类型施肥量多少、复种指数大小、作物对所施用养分利用率、土壤N素浓度本底值和种植区域作物植被密度密切相关^[20]。由于蔬菜和苗木为露天旱地种植,降雨形成地表径流将农田残留化肥冲刷进入沟渠,同时旱地种植中NO₃-N是地表径流中N素流失的主要形态^[21],洱海流域现有农田种植模式下大量无机态N残留在土壤中,并且以NO₃-N形式为主^[22]。烟草种植类型区DTP是沟渠进出水径流中P的主要形态,由于烟草种植区沟渠较为平缓,使得沟渠径流流速较为平缓,农田径流流失的P进入沟渠后,通过沟渠植物拦截吸附、颗粒沉降后,沟渠径流中P形态以DTP为主^[13]。水稻和苗木种植区沟渠进出水中P形态有一定差异,沟渠径流通过苗木和水稻种植区后P的主要形态分别为PP和DTP,因稻田P

表3 水质影响因素及污染物贡献率(%)

Table 3 Influence factors of water quality and contribution rate of pollutants(%)

作物种植类型 Crop planting type	沟渠进出水 Ditches in and out of water	水质影响因素占比 Proportion of factors affecting water quality					污染物贡献率 Contribution rate of pollutant				
		TN	TP	NH ₄ ⁺ -N	DO	COD	TN	TP	NH ₄ ⁺ -N	DO	COD
蔬菜 Vegetable	进水 Inflow	35.04	10.46	10.90	14.89	28.71	71.97	37.29	-57.88	7.51	11.42
	出水 Outlet	56.95	10.31	2.84	9.87	20.03					
苗木 Nursery stock	进水 Inflow	14.06	15.68	4.16	40.29	25.81	62.89	20.64	20.37	-1.28	34.24
	出水 Outlet	26.67	13.90	3.67	28.13	27.62					
烟草 Tobacco	进水 Inflow	44.87	13.23	5.24	11.30	25.37	-22.09	57.96	20.93	0.80	16.74
	出水 Outlet	31.56	27.01	5.68	9.58	26.16					
水稻 Paddy rice	进水 Inflow	24.74	14.06	5.69	19.55	35.96	3.20	-5.18	10.11	2.92	6.79
	出水 Outlet	24.64	12.85	6.10	19.21	37.19					

表4 雨季水质评价结果

Table 4 Results of monthly water quality evaluation of rainy season

作物种植类型 Crop planting type	沟渠进出水 Ditches in and out of water	灰色模式识别分析 Grey pattern recognition analysis			
		灰色综合指数 Grey composite index(GC)	水质类型 Water type	水质指数差 Water quality index difference(ΔGC)	单位种植面积指数差 Index difference per unit area($\Delta GC \cdot \text{hm}^{-2}$)
蔬菜 Vegetable	进水 Inflow	3.697 5	IV	0.890 5	0.057 2
	出水 Outlet	4.588 0	V		
苗木 Nursery stock	进水 Inflow	2.001 0	II	0.053 1	0.014 1
	出水 Outlet	2.054 1	III		
烟草 Tobacco	进水 Inflow	4.871 2	V	0.103 8	0.015 5
	出水 Outlet	4.975 1	V		
水稻 Paddy rice	进水 Inflow	3.316 4	IV	0.001 2	0.000 2
	出水 Outlet	3.317 6	IV		

流失须经田面水这一过程,田底部土壤受扰动较小,田面水进入沟渠后径流中PP在沟渠中植物作用下沉降,而苗木种植中降雨以及地表径流直接冲刷土壤,形成土壤侵蚀,造成沟渠中PP浓度增大。流域种植区农田大量施用有机肥导致土壤有机质增加,同时田间大量残留蔬菜叶片与秸秆分解^[23],在降雨冲刷下进入沟渠,因此,导致径流中COD值出现显著增加。

3.2 不同种植类型对沟渠径流污染物贡献率及水质影响占比

通过表3可知,4种植类型农田沟渠TN和COD是沟渠水质变化主要影响因子。蔬菜种植对沟渠径流中TN影响最大,沟渠径流水质TN影响占比的增加主要来自于蔬菜种植过程中的农田N素排放,由种植类型污染贡献率变化可知,蔬菜种植区农田对沟渠径流TN贡献率最大,主要在于蔬菜种植中复种指数高,过量施肥,频繁灌溉和土壤大量残留^[24],使得农田N、P大量流失,是农田面源污染防治中重点控制的种植类型。由于蔬菜种植区沟渠坡度较大,使得沟渠流速较快,含氧量增加,同时在沟渠中植物根系过滤拦截与底泥沉淀削减^[25]作用下沟渠径流COD浓度减小,水质影响占比降低。不同于蔬菜和苗木种植区,烟草种植区沟渠进出水TN占比下降的同时TP占比却大幅增加,且烟草种植对沟渠径流TP有着最大贡献,这可能与烟草不同种植方式密切相关。水稻种植对种植区沟渠径流有着最小的影响,说明水稻种植中农田N、P的排放量较小,这与洱海北部稻田N、P的排放量不同^[11],主要在于洱海北部(水稻-大蒜)与西部(水稻-蚕豆)轮作模式差异,水稻前作作物蚕豆种植相比于大蒜施肥量小,后期土壤流失N、P较少。苗木种植过程中对TN和TP贡献大于水稻种植,由于研究区

域内种植苗木多为中小型景观性植物,生长周期较短,同时研究期内较为频繁的移栽和除草等人为干扰因素较多,且洱海流域高原地区气候及降雨条件的变化,导致苗木种植过程中N、P流失较大。

3.3 “中心化”灰色模式识别模型水质综合分析

根据表4中数据计算可知,通过数据模型计算将沟渠大量水质监测指标参数综合分析,通过计算以相应地表水质类别和灰色综合指数变化对不同种植类型沟渠径流污染变化进行直观且精确的评价,沟渠水质类别和灰色综合指数变化可以直观地表现出流域不同种植类型对水质变化的影响。按照灰色关联度(γ)与隶属度(U)值最大决定原则和灰色综合指数(GC)意义^[26]可知,4种植类型区农田沟渠出水水质类别在Ⅲ~Ⅴ类,沟渠径流单位面积指数差($\Delta GC \cdot \text{hm}^{-2}$)从大到小依次排序分别为蔬菜、烟草、苗木和水稻,蔬菜种植区农田沟渠径流 $\Delta GC \cdot \text{hm}^{-2}$ 值最大,由于蔬菜多为露天种植,与温室种植相比,露天种植完全依靠自然(阳光、温度和季节变化)进行蔬菜生产,生产率和利润低^[27],为提高产量造成农田大量农家肥及化肥施用,因此大量N、P残留在土壤中,且在蔬菜作物收割后土壤中残留较多,加剧N、P流失的可能性,使得沟渠水体中TN和TP浓度增大。有研究表明,农田土壤中N、P流失受降雨强度、植被覆盖度和土壤含水量影响较大^[28],且蔬菜种植中复种率较高,生长周期较短,农田作物种植单一,加之长期耕种导致土壤容重降低^[24],导致雨季土壤侵蚀现象相比于其他种植类型更为严重,也有研究表明蔬菜种植N、P流失高于一般旱地种植^[29]。烟草种植中的覆膜处理相比传统的裸地种植减少了雨水的直接接触,减少了雨水对土壤的直接冲刷^[30],降低了径流中TN浓度,由于烟草种

植模式为起垄单行覆膜种植,垄沟耕作只对田垄进行覆膜,田垄之间并未覆膜,导致降雨冲刷形成土壤侵蚀,土壤侵蚀形成地表径流TP浓度较高。加之烟草种植过程中较为频繁的生产活动使得种植覆膜遭到破坏,烟草种植后期田垄土壤中大量氮磷等物质在雨水冲刷下进入沟渠径流,导致沟渠径流出水GC值大于径流进水。苗木相比旱地蔬菜以及烟草种植,施肥量较少,同时苗木种植中翻耕次数少,且不进行基肥施加,仅进行穴施为主的后期施肥处理^[31],N、P流失较小,同时较大降雨量对地表径流起到了一部分稀释作用。水稻相比旱地作物种植,其N、P流失主要来自于稻田排水,在水稻的不同生长期稻田N、P负荷有着明显差异^[32],稻田淹水初期N、P损失均处于较高水平,但随着淹水时间的延长而逐渐降低,但这一时期降雨较少,稻田为保持一定的田间地表水深,导致稻田排水较低,N、P流失较少,在强降雨期间,由于降雨稀释以及水稻生长消耗,稻田排水导致N、P损失降低,使得沟渠径流N、P含量低于其他旱地作物种植下沟渠。

近年来,洱海水水质总体保持在Ⅱ~Ⅲ类地表水标准,从沟渠出水综合水质类别可知,苗木、水稻、蔬菜和烟草种植区沟渠出水口水质类别较高,农灌沟渠出水径流直排洱海,导致洱海水水质进一步恶化。为降低种植区沟渠对洱海水水质污染,可以对4种植类型在苍山-洱海向农田空间分布上进行科学搭配,搭配方式为“菜地-烟草地-苗木地-稻田-湖滨缓冲带”,通过种植类型的空间分布优化结合,利用沟渠的灌排功能,上游来水灌溉进入菜地和烟草地,过量灌溉用水或降雨形成的地表径流携带新增N、P重新进入沟渠,发挥“源”的作用,沟渠径流水体逐级进入苗木地,最后进入稻田,通过稻田湿地效应^[33],对沟渠径流水体中N、P起到“汇”的效果,同时对农田灌排沟渠进行生态化改造,提高对农田排水中N、P等污染物的削减^[3],在种植区入湖末端配置生态库塘和湿地,形成湖滨缓冲带,对沟渠排水中N、P等污染物进一步削减,以及尾水回用^[34],以实现流域农田面源污染防治的源头减量、过程拦截、养分循环利用和末端净化“4R”策略^[35],以保护洱海流域水生生态环境安全。

4 结论

(1)洱海海西种植区4种植类型下农田对沟渠出水中N、P的影响从大到小依次为蔬菜、烟草、苗木和水稻。4种植类型下沟渠水体中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 是N素

的主要形态,占TN浓度的60.43%~81.35%,DTP是烟草种植区沟渠径流P素的主要形态,苗木和水稻种植区沟渠径流进出水中P素的主要形态都发生了变化,沟渠径流通过苗木和水稻种植区后P的主要形态分别为PP和DTP,农灌沟渠对径流中 $\text{NH}_4\text{-N}$ 起到一定削减作用。

(2)综合平均污染指数和种植污染贡献率分析显示径流水质影响因子占比排序为TN(COD)>COD(TN)>TP> $\text{NH}_4\text{-N}$,水体中TN和COD是沟渠径流水质主要影响因子,蔬菜和烟草种植分别是沟渠径流中TN与TP污染物主要来源,水稻种植对沟渠径流中COD污染贡献率较小。

(3)通过改进灰色模式识别模型对洱海海西不同种植区农灌沟渠水质进行评价,不同种植类型种植区内沟渠单位面积灰色综合指数差($\Delta\text{GC}\cdot\text{hm}^{-2}$)排序为蔬菜(0.057 2)>烟草(0.015 5)>苗木(0.014 1)>水稻(0.000 2),受种植区沿程农田灌排生产活动影响沟渠径流水质污染程度恶化,其中蔬菜种植对沟渠水质影响最大,而水稻种植最小。

参考文献:

- [1] Zhang W, Jin X, Liu D, et al. Temporal and spatial variation of nitrogen and phosphorus and eutrophication assessment for a typical arid river: Fuyang River in northern China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2017, 55:41-48.
- [2] Qin B Q, Gao G, Zhu G W, et al. Lake eutrophication and its ecosystem response[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(9):961-970.
- [3] Han H, Cui Y, Gao R, et al. Study on nitrogen removal from rice paddy field drainage by interaction of plant species and hydraulic conditions in eco-ditches[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(7):6492-6502.
- [4] Wang S, Zhang L, Ni L, et al. Ecological degeneration of the Erhai Lake and prevention measures[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 74(5):3839-3847.
- [5] Zhang L, Wang S, Wu Z. Coupling effect of pH and dissolved oxygen in water column on nitrogen release at water-sediment interface of Erhai Lake, China[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2014, 149:178-186.
- [6] Xu Q L, Yang K, Wang G L, et al. Agent-based modeling and simulations of land-use and land-cover change according to ant colony optimization: A case study of the Erhai Lake Basin, China[J]. *Natural Hazards*, 2015, 75(1):95-118.
- [7] 卢中辉,余斌,张辉,等.洱海流域农业面源污染与水环境变化的关联分析[J]. *华中师范大学学报(自然科学版)*, 2017, 51(2):215-223. LU Zhong-hui, YU Bin, ZHANG Hui, et al. Correlation analysis of agricultural non-point source pollution and water environment change in Erhai Lake watershed[J]. *Journal of Central China Normal University*

- (*Natural Sciences*), 2017, 51(2):215-223.
- [8] 唐佳, 李德品, 姜旭. 洱海北部典型小流域农业氮磷流失特征的初步研究[J]. 大理学院学报, 2014, 13(6):60-63.
- TANG Jia, LI De-pin, JIANG Xu. Primary study on characteristics of nitrogen and phosphorus losses in the typical small watershed of the northern area of Erhai Lake[J]. *Journal of Dali University*, 2014, 13(6):60-63.
- [9] Li W, Liu H, Zhai L, et al. Evaluation of concentration-discharge dynamics and nitrogen export on anthropogenic inputs and stormflow across alternative time-scales[J]. *Ecological Indicators*, 2019, 98:879-887.
- [10] 庞燕, 项颂, 储昭升, 等. 洱海流域农业用地与入湖河流水质的关系研究[J]. 环境科学, 2015, 36(11):4005-4012.
- PANG Yan, XIANG Song, CHU Zhao-sheng, et al. Relationship between agricultural land and water quality of inflow river in Erhai Lake Basin[J]. *Environmental Science*, 2015, 36(11):4005-4012.
- [11] Tang Q X, Ren T Z, Zhai L M. Characteristics of nitrogen and phosphorus losses in different crop rotation systems in the North of Erhai Lake Basin[J]. *Agricultural Science and Technology*, 2012, 13(10):2206-2212.
- [12] Ye Y, He X, Chen W, et al. Seasonal water quality upstream of Dahuo-fang Reservoir, China: The effects of land use type at various spatial scales[J]. *CLEAN-Soil, Air, Water*, 2014, 42(10):1423-1432.
- [13] 陈安强, 雷宝坤, 刘宏斌, 等. 洱海近岸不同种植类型农田沟渠径流氮磷流失特征[J]. 生态与农村环境学报, 2017, 33(8):697-705.
- CHEN An-qiang, LEI Bao-kun, LIU Hong-bin, et al. Characteristics of N and P losses from ditch runoff in farmlands different in planting patterns offshore of Lake Erhai[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2017, 33(8):697-705.
- [14] Liu F, Wang Y, Xiao R, et al. Influence of substrates on nutrient removal performance of organic channel barriers in drainage ditches[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 527:380-386.
- [15] 谢坤, 罗元, 冯弋洋, 等. 改进灰色模式识别模型评价洱海雨季灌排沟渠水质[J]. 农业工程学报, 2019, 35(23):234-241.
- XIE Kun, LUO Yuan, FENG Yi-yang, et al. Water quality evaluation of Erhai drainage ditch based on improved grey-mode identification model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(23):234-241.
- [16] Ban X, Yu C, Pan B, et al. Application of the CWQII method and a 2D water quality model to assess diversion schemes for East Lake (Donghu), Wuhan, China[J]. *Lake and Reservoir Management*, 2014, 30(4):358-370.
- [17] 姚金玲, 张克强, 郭海刚, 等. 不同施肥方式下洱海流域水稻-大蒜轮作体系氮磷径流损失研究[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(11):2287-2296.
- YAO Jin-ling, ZHANG Ke-qiang, GUO Hai-gang, et al. Nitrogen and phosphorus runoff losses during rice-garlic rotation in Erhai Lake basin under different fertilization methods[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(11):2287-2296.
- [18] 陈兴位, 闫辉, 倪明, 等. 长期施用有机肥对洱海流域蔬菜地生产力的影响[J]. 西南农业学报, 2014, 27(4):1577-1581.
- CHEN Xing-wei, YAN Hui, NI Ming, et al. Effect of long-term applying organic matter on vegetable field productivity in Erhai Lake basin[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2014, 27(4):1577-1581.
- [19] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002:701-705.
- State Environmental Protection Administration. Methods for monitoring and analysis of water and wastewater[M]. 4th Edition. Beijing: China Environmental Science Press, 2002:701-705.
- [20] 沈连峰, 苗蕾, 韩敏, 等. 河南省淮河流域不同土地利用类型氮磷流失的特征分析[J]. 水土保持学报, 2012, 26(4):77-80.
- SHEN Lian-feng, MIAO Lei, HAN Min, et al. Characteristics analysis of nitrogen and phosphorus loss about different land use types of Huaihe River Basin in Henan Province[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(4):77-80.
- [21] 高德才, 张蕾, 刘强, 等. 不同施肥模式对旱地土壤氮素径流流失的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(3):209-213.
- GAO De-cai, ZHANG Lei, LIU Qiang, et al. Effects of different fertilization modes on soil nitrogen runoff in dryland field[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(3):209-213.
- [22] Eneji A E, Islam R, An P, et al. Nitrate retention and physiological adjustment of maize to soil amendment with superabsorbent polymers[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2013, 52:474-480.
- [23] 湛方栋, 傅志兴, 杨静, 等. 滇池流域套作玉米对蔬菜农田地表径流污染流失特征的影响[J]. 环境科学学报, 2012, 32(4):847-855.
- ZHAN Fang-dong, FU Zhi-xing, YANG Jing, et al. Effects of maize intercropping on characteristics of surface runoff pollution from vegetables fields in Dianchi watershed[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32(4):847-855.
- [24] Dodd R J, McDowell R W, Condon L M. Is tillage an effective method to decrease phosphorus loss from phosphorus enriched pastoral soils?[J]. *Soil and Tillage Research*, 2014, 135:1-8.
- [25] 吴华山, 赵慧, 黄红英, 等. 不同季节生态沟净化养殖废水能力对比研究[J]. 农业资源与环境学报, 2018, 35(3):245-250.
- WU Hua-shan, ZHAO Hui, HUANG Hong-ying, et al. Abilities of ecological ditch to purify livestock wastewater in different seasons[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2018, 35(3):245-250.
- [26] 田伟东, 贾克力, 史小红, 等. 2005—2014年乌梁素海湖泊水质变化特征[J]. 湖泊科学, 2016, 28(6):1226-1234.
- TIAN Wei-dong, JIA Ke-li, SHI Xiao-hong, et al. Water quality variation in Lake Wuliangsu, 2005-2014[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2016, 28(6):1226-1234.
- [27] Yan Z, Liu P, Li Y, et al. Phosphorus in China's intensive vegetable production systems: Over fertilization, soil enrichment, and environmental implications[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2013, 42(4):982-989.
- [28] Liu R, Wang J, Shi J, et al. Runoff characteristics and nutrient loss mechanism from plain farmland under simulated rainfall conditions[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 468:1069-1077.
- [29] 寇永珍, 林陶, 夏品华. 贵州草海湿地农田沟渠水质污染特征及其

- 治理研究[J]. 广东农业科学, 2015, 42(14):120-125.
- KOU Yong-zhen, LIN Tao, XIA Pin-hua. Pollution characteristics and treatment of water in farmland ditch of Caohai wetland, Guizhou Province[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2015, 42(14):120-125.
- [30] 王军, 陈能场, 詹振寿, 等. 不同种植方式对烟田氮素径流损失的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(5):68-73.
- WANG Jun, CHEN Neng-chang, ZHAN Zhen-shou, et al. Influence of different planting methods on runoff losses of nitrogen in tobacco field soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(5):68-73.
- [31] 廖敏, 叶照金, 黄宇, 等. 长兴县合溪水库集雨区苗木地不同施肥管理模式对径流磷素流失的影响[J]. 生态学报, 2017, 37(21):7342-7350.
- LIAO Min, YE Zhao-jin, HUANG Yu, et al. Influence of different fertilization management modes on phosphorus loss in runoff from nursery land in the catchment area of Hexi Reservoir in Changxing County [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(21):7342-7350.
- [32] Xiao M, Yu S, She D, et al. Nitrogen and phosphorus loss and optimal drainage time of paddy field under controlled drainage condition[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2015, 8(7):4411-4420.
- [33] 薛利红, 杨林章. 太湖流域稻田湿地对低污染水中氮磷的净化效果[J]. 环境科学研究, 2015, 28(1):117-124.
- XUE Li-hong, YANG Lin-zhang. Purification of water with low concentrations of N and P in paddy wetlands in Taihu Lake Region[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2015, 28(1):117-124.
- [34] 朱金格, 张晓姣, 刘鑫, 等. 生态沟-湿地系统对农田排水氮磷的去除效应[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(2):405-411.
- ZHU Jin-ge, ZHANG Xiao-jiao, LIU Xin, et al. Removal of nitrogen and phosphorus from farmland drainage by ecological ditch-wetland system[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(2):405-411.
- [35] 杨林章, 施卫明, 薛利红, 等. 农村面源污染治理的“4R”理论与工程实践——总体思路与“4R”治理技术[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(1):1-8.
- YANG Lin-zhang, SHI Wei-ming, XUE Li-hong, et al. Reduce-retain-reuse-restore technology for the controlling the agricultural non-point source pollution in countryside in China: General countermeasures and technologies[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(1):1-8.