

冯国禄,杨 斌,鲁栋梁,等. 基于水分管理的稻田养分流失潜力分析及其拟合预测模型[J]. 江苏农业科学,2018,46(19):335-338.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.19.085

基于水分管理的稻田养分流失潜力分析 及其拟合预测模型

冯国禄,杨 斌,鲁栋梁,田义超

(钦州学院,广西钦州 535011)

摘要:为探明施用春插面肥后的水分管理对春耕稻田养分流失潜力的影响,采用滞水时间控制与单排单灌水分管理系统相结合的关键技术,以春插面肥种类和蓄水深度为试验因素,对田面水中氮磷养分流失潜力的动态进行分析;在此基础上以 3 层后向传播(back propagation,简称 BP)神经网络为工具,选取春插面肥种类、蓄水深度、动态时间等 3 个指标作为输入结点,以氮磷等养分流失潜力作为输出指标,对采集的样本进行训练和验证。结果表明,(1)施用 F_1 ($N:P_2O_5:K_2O=21:6:13$) 后, H_3F_1 、 H_6F_1 、 H_9F_1 处理(H_3 、 H_6 、 H_9 分别表示蓄水深度为 3、6、9 cm)的田面水中氮素形态以较为活跃的 $NO_3^- - N$ 为主。 F_2 ($N:P:K=3:1:1$) 是一种液体有机肥,不易被硝化细菌消化。施用 F_3 (尿素 17.1%、过磷酸钙 12.0%、氯化钾 60.0%) 1 d 后, H_9F_3 、 F_3F_3 处理均处于低水平,反硝化作用不明显。可见,施用 F_2 和 F_3 可有效减少 $NO_3^- - N$ 的流失。(2)将 H_9F_3 、 H_3F_3 处理滞水至施肥 5 d 后排放,可有效减少田面水中 $NH_4^+ - N$ 的流失。(3)将 H_3F_2 、 H_9F_3 处理滞水至施肥 5 d 后排水,可有效减少总磷的流失。(4)将 H_3F_3 、 H_9F_3 、 H_6F_3 处理滞水至施肥 3 d 后排水,可有效减少田面水中总氮的流失。(5)应用田面水中氮、磷等养分流失潜力实测数据构建 BP 神经网络模型,得出基于面肥种类、蓄水深度以及动态时间的春耕稻田养分流失潜力的拟合预测模型。可得出的结论:(1)施用单质混合肥蓄水 9 cm,并滞水至施肥 5 d 后排水是一种清洁的水分管理模式;(2)应用氮、磷等养分流失潜力实测数据,构建 BP 神经网络模型,得出基于面肥种类、蓄水深度以及动态时间的养分流失拟合预测模型为 $Output = 0.57 \times Target + 0.71$, $r^2 = 0.569\ 91$ 。该模型的建立与求解过程可为稻田水分的有效管理提供科学的基础数据。

关键词:水分管理;养分流失潜力;BP 神经网络;影响;拟合预测模型

中图分类号: S152.7;S158 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2018)19-0335-04

我国湖泊富营养化的水体已占 63.6%,农业主产区中的太湖、巢湖、滇池等地的水质总氮、总磷含量与 20 世纪 80 年代相比大幅增加。农田地表径流所流失的氮磷,成为我国南方地区农业面源污染和河湖水质富营养物质污染的主要来源^[1]。

氮肥、磷肥施入土壤后,由于施肥、排灌水方式不当等原因,被作物吸收利用的肥料量分别占其总施肥量的 30%~35%、15%~25%^[2]。目前水稻田的养分流失现象相当普遍,已经对水体环境质量产生了巨大的威胁。陆地生态系统氮、磷的大量输入是最终导致湖泊富营养化的重要因素,而降水地表径流及地下排水径流是农业非点源污染的主要排放形式。随着社会的持续发展,粮食需求量巨增,水体富营养化具有进一步恶化的趋势,水体富营养化易导致生态系统崩溃和物种灭绝,已成为构建和谐生态、建设生态良好型社会过程中亟待解决的核心水污染问题^[3-4]。地表径流氮主要包括颗粒氮和溶解性氮,其中溶解性氮以铵态氮($NH_4^+ - N$)、硝态氮($NO_3^- - N$)为主。

控制排水是降低稻田地表径流损失的重要方式,主要措施包括 3 个方面,(1)控制排水时间,若降水量大且持续时间长,则应延缓降水期间稻田直接向田沟排水的时间,这有利于增加稻田田面水深度,降低因降水击溅侵蚀和化学侵蚀而进入地表水中的土壤颗粒和可溶性氮、磷数量^[5],对于刚施肥的稻田效果尤其明显。(2)增加降水后涝水在排水沟中的滞留时间,这有利于发挥排水沟湿地功能,促使水中悬移物质或颗粒态的氮、磷沉淀下渗,降低氮、磷的排放浓度,减轻氮、磷对附近水体的污染^[6]。(3)采取零排放水分管理模式,即在水稻的整个生育期内只灌水不排水的稻田水分管理技术^[7]。张志剑等采用零排放水分管理模式进行试验发现,一季水稻田的溶解态磷(dissolved phosphorus,简称 DP)的净排放负荷降为负值,稻田由输出磷素的“源”转为截流磷素的“汇”^[8]。零排放水分管理模式为减少稻田氮、磷流失提供了新的思路。Takeda 等通过研究得出,在流域系统中,氮、磷的排放负荷随着年降水量的增多呈近似线性增加趋势,但随着滞水时间的延长而减少,且在前几天急剧下降,之后逐渐趋于定值甚至随着时间的延长成为负值,即流域成为氮、磷的“汇”^[9]。

鉴于稻田环境系统自身的复杂性、高维性以及各因素之间的非线性关系,将对复杂系统非线性特征具有很强捕捉能力的后向传播(back propagation,简称 BP)神经网络^[10]应用于氮、磷等养分流失潜力拟合预测模型的构建。BP 神经网络

收稿日期:2017-05-12

基金项目:国家自然科学基金(编号:31360322);广西自然科学基金(编号:2014GXNSFAA118126)。

作者简介:冯国禄(1964—),男,湖南永州人,博士,教授,主要从事农业非点源污染控制研究。E-mail:fengguolu8@163.com。

是一种通过模拟人脑神经元结构和功能而设计的信息系统^[8],与传统方法相比,具有模糊的数据、须要决定的模式特征不明确、数据本身非线性、随机数据或数据中含有较多的噪声等优势^[10-12]。其中,BP 神经网络因解决了多层前馈网络的学习问题而成为目前最流行的神经网络系统。

国内外关于农田土壤氮、磷形态与转化过程的研究较多,而在水分管理方面的研究报道却相对较少,因此,研究施肥及水分管理对稻田氮、磷养分流失潜力的影响,对控制氮、磷流失、保护环境具有较好的科学意义。为尽量减轻试验立地条件受外界较大随机性春季降水过程的影响,本研究采用滞水时间控制与单排单灌水分管理系统相结合的关键技术,设计以春插面肥种类和蓄水深度为试验因素(2 因素 3 水平)的小区模拟试验,对田面水中氮、磷养分流失潜力的动态进行分析。另外,以 3 层 BP 神经网络为工具,选取春插面肥种类、蓄水深度、动态时间等 3 个指标作为输入结点,以非点源污染物(氮、磷等养分)流失潜力作为输出指标,应用 Matlab R2014a[®] 软件对采集的样本进行训练和验证,获得氮、磷等养分流失潜力拟合预测模型,并对该模型进行误差检验。本研究旨在为我国南方稻田的有效水分管理提供科学的基础数据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验在广西壮族自治区钦州市农业科学研究所进行,地处 20°53′~22°42′ N,107°27′~109°56′ E 之间,年平均气温为 22℃,年平均降水量为 1 600 mm。供试土壤为水稻土,其基本理化性状:有机质含量为 18.5 g/kg,总氮(total nitrogen,简称 TN)含量为 0.95 g/kg,总磷(total phosphorus,简称 TP)含量为 0.87 g/kg,总钾(total kalium,简称 TK)含量为 0.34%,水解性氮(N)含量为 195 mg/kg,有效磷(P)含量为 50.1 mg/kg,速效钾(K)含量为 97 mg/kg,pH 值为 6.34。供试肥料为固体复合肥、液体复合肥以及单质混合肥(由尿素、过磷酸钙、氯化钾等混合而成),其施肥量均为 750 kg/hm²。

1.2 试验设计

于 2015 年 4 月中旬进行春耕试验。以春插面肥种类为试验因素之一,将春插面肥种类的 3 个水平分别设为固体复合肥、液体复合肥、单质混合肥,分别表示为 F₁(N:P₂O₅:K₂O=21:6:13)、F₂(N:P:K=3:1:1)、F₃(尿素 17.1%、过磷酸钙 12.0%、氯化钾 60.0%)。以蓄水深度为另一试验因素,设蓄水深度为 3、6、9 cm 3 个水平,分别表示为 H₃、H₆、H₉。

应用 SPSS 软件对以春插面肥种类和蓄水深度为试验因素的春耕试验进行 L₉(3²) 正交试验设计。各试验小区面积为 18 m²,小区田埂筑高 0.4 m,并用塑料薄膜包被(入土 0.45 m),以减少侧渗和串流。在试验大田中建立 1 个独立的单排单灌水分管理系统,春耕用水由当地的农田灌溉系统提供。

本研究的正交试验设计中有 9 个试验组合,每个组合设 3 次重复,共计 27 个试验小区,随机区组排列(图 1、图 2)。

1.3 样品采集

模拟春耕时将肥料施入大田与土壤耕作层混合均匀以提高肥效的方法,于施肥处理完成 0、1、3、5、7、9 d 后,分别从模

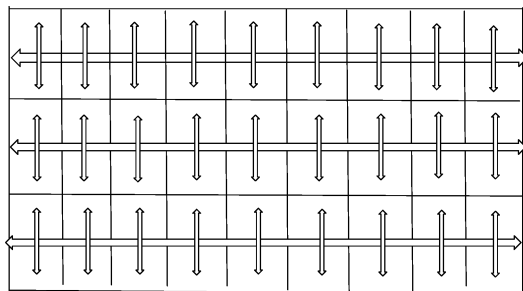


图1 试验小区及单排单灌水分管理系统设计俯视图

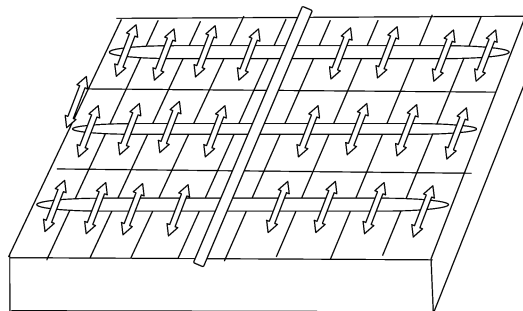


图2 试验小区及单排单灌水分管理系统设计立体图

拟小区稻田中采水样带回实验室并立即测定各项指标的含量。

1.4 数据分析与处理

水样各指标测定方法^[13]:总氮含量采用硫酸钾氧化-紫外分光光度法进行测定;铵态氮(NH₄⁺-N)含量的测定参照 GB/T 7479—1987《水质 铵的测定 纳氏试剂比色法》;硝态氮(NO₃⁻-N)含量的参照 GB/T 7480—1987《水质 硝酸盐氮的测定 酚二磺分光光度法》;总磷含量的测定参照 GB/T 11893—1989《水质 总磷的测定 钼酸铵分光光度法》。

采用瞬时养分绝对流失量法进行数据处理,具体公式为

$$\Delta Q_i = A \times C_i \times X_i$$

式中:A 为稻田小区面积;C_i 为各采样时间(D)各指标的浓度;X_i 为蓄水高度。由于各小区面积一致,而 H₆、H₉ 处理的蓄水深度又分别是 H₃ 处理的 2、3 倍,假定在各采样时间点小区稻田田面水中短时内迅速全部排干,H₃ 处理的养分相对流失量为 $\Delta Q_{ai} = C_i \times X_i$,则 H₆ 处理的相对流失量为 $\Delta Q_{bi} = 2C_i \times X_i$,H₉ 处理的相对流失量为 $\Delta Q_{ci} = 3C_i \times X_i$,以此来分析田面水中各指标的相对流失潜力。各指标的相对流失量为 3 次重复数据的平均值。

2 结果与分析

2.1 NO₃⁻-N、NH₄⁺-N 相对流失量分析

由图 3 可知,施用 F₁ 后,H₃F₁、H₆F₁、H₉F₁ 处理中的 NO₃⁻-N 相对流失量在施肥 1 d 后达到较大值,分别为 69.15、119.10、36.16 mg,且 3 个处理从施肥后 1 d 至 5 d 均保持较高的 NO₃⁻-N 相对流失量水平,施肥 5 d 后田面水中的 NO₃⁻-N 相对流失量呈下降趋势,但总体上表现为 H₆ 处理 > H₃ 处理 > H₉ 处理。其他处理在整个试验过程中 NO₃⁻-N 的相对流失量均处于较低的水平。说明施用 F₁ 后,固体复合肥中的氮元素容易在土壤中微生物的硝化作用下迅速释放出来。而施用 F₂ 和 F₃,则由于土壤微生物对其

硝化作用相对较弱,致使释放至田面水中的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 处于较低的水平。因此,从减少田面水中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的流失潜力看,施用 F_2 和 F_3 比施用 F_1 的减排效果更佳。

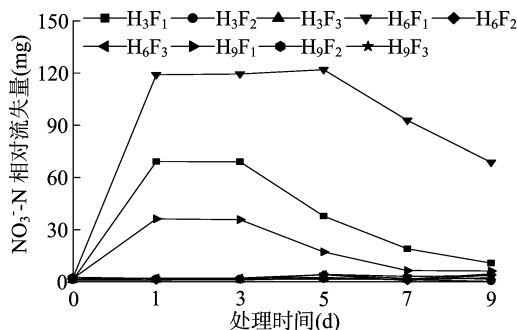


图3 施肥处理后不同蓄水深度的田面水中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的相对流失潜力动态分析结果

由图4可知,除 H_9F_1 、 H_3F_3 、 H_9F_3 处理外,其他处理小区的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 相对流失量在施肥1 d后均处于较高水平,其中 H_6F_2 处理的最高,达 151.26 mg; H_3F_2 处理的相对较低,为 48.24 mg; H_9F_1 处理的最低,为 15.27 mg。其中 H_3F_1 、 H_9F_2 、 H_6F_3 、 H_3F_3 、 H_9F_3 等处理的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 相对流失量在施肥1 d后呈下降趋势,至施肥5 d后处于较低水平,而 H_6F_2 、 H_6F_1 处理在整个试验阶段均处于较高水平。因此,将 H_9F_3 、 H_3F_3 处理滞水至施肥5 d后排放,可有效减少田面水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的流失。

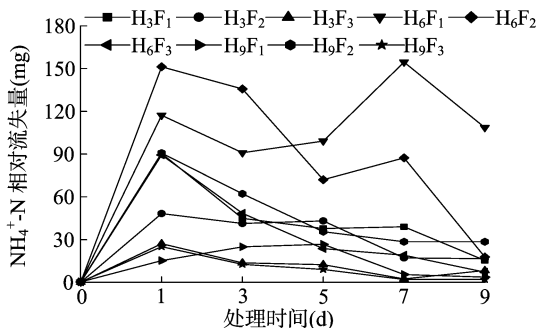


图4 施肥处理后不同蓄水深度的田面水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的相对流失潜力动态分析结果

2.2 TP、TN 相对流失量分析

由图5可见,在施肥1 d后, H_9F_2 、 H_6F_2 、 H_6F_1 处理的 TP 相对流失量达到峰值,其中 H_9F_2 处理最高,达 118.29 mg,而 H_6F_3 、 H_3F_2 处理的 TP 相对流失量则于3 d后达到峰值。施肥5 d后, H_3F_2 、 H_9F_3 处理的 TP 相对流失量逐渐下降至较低水平,分别为 18.61、27.21 mg。因此,从减少 TP 流失潜力看,将 H_3F_2 、 H_9F_3 处理滞水至施肥5 d后排水是较为安全的措施。

由图6可见,各处理田面水中 TN 的相对流失量均于施肥1 d后达到峰值,其中 H_6F_2 处理的最高,为 521.64 mg;施肥3 d后,田面水中 TN 的相对流失量迅速下降,其中 H_3F_3 、 H_9F_3 、 H_6F_3 处理的 TN 相对流失量较低,为 15.90 ~ 50.90 mg。因此,将 H_3F_3 、 H_9F_3 、 H_6F_3 处理滞水至施肥3 d后排水,可有效减少田面水中 TN 的流失。

2.3 氮、磷等养分流失潜力拟合预测模型分析

本研究在进行 BP 神经网络计算时,以春插面肥种类、蓄水深度、动态时间等 3 个指标作为输入结点,以非点源污染物

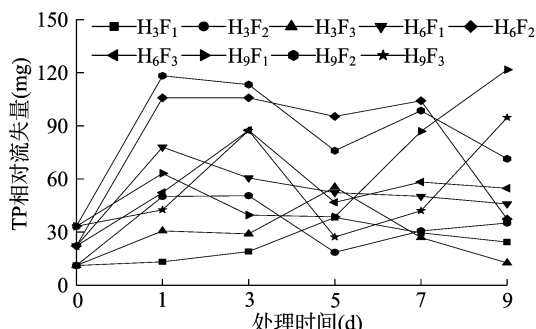


图5 施肥处理后不同蓄水深度的田面水中 TP 的相对流失潜力动态分析结果

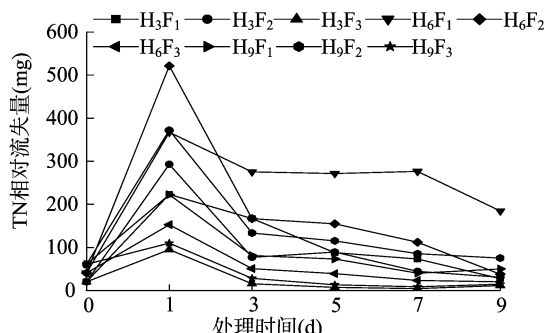


图6 施肥处理后不同蓄水深度的田面水中 TN 的相对流失潜力动态分析结果

(氮、磷等养分)流失潜力作为输出指标,在数据的处理过程中,由于氮、磷等养分流失数据变化幅度较大,会对模型的模拟结果产生影响,为解决这一问题,将实测的数据进行归一化处理。归一化处理能够加快神经网络的收敛。因此,应用 Matlab R2014a® 软件对采集的样本进行训练和验证,并对该模型进行误差检验,以获得氮、磷等养分流失潜力拟合预测模型。

将标准化的数据作为训练材料,训练图7中建立的 BP 神经网络模型。将氮、磷等养分流失潜力作为输出指标,通过模型训练和模型验证,得到面肥种类、蓄水深度以及动态时间对稻田田面水中养分流失量的最优拟合方程为 $\text{Output} = 0.57 \times \text{Target} + 0.71$, $r^2 = 0.56991$,其中 Output 表示输出值, Target 表示目标值。

因此,若已知非点源污染物(氮、磷等养分)流失潜力实测数据,则可以通过构建神经网络模型,得出基于面肥种类、蓄水深度、动态时间的春耕稻田养分流失潜力的拟合预测模型。

3 结论与讨论

采用室外微区模拟稻田春耕施肥耕整试验,结果发现,3、6、9 cm 等 3 个不同蓄水深度处理田面水中的氮、磷浓度变化与土壤中的氮、磷释放密切相关^[14]。稻田春耕耕整后滞水缓排技术可以减少春耕稻田随排(退)水迁移流失的氮、磷污染物,有效减轻春季农业非点源污染^[15]。基肥施入后 8 d 内田面水中的总氮、总磷含量明显衰减,并于施肥 8 d 后趋于稳定,且处于较低水平^[16]。春耕稻田撒施固体复合肥,在蓄水 5~6 cm 的条件下,于第 5 天或第 7 天排水,减排排污效果显著;与第 3 天排水相比,第 5 天排水可减少排放的总氮

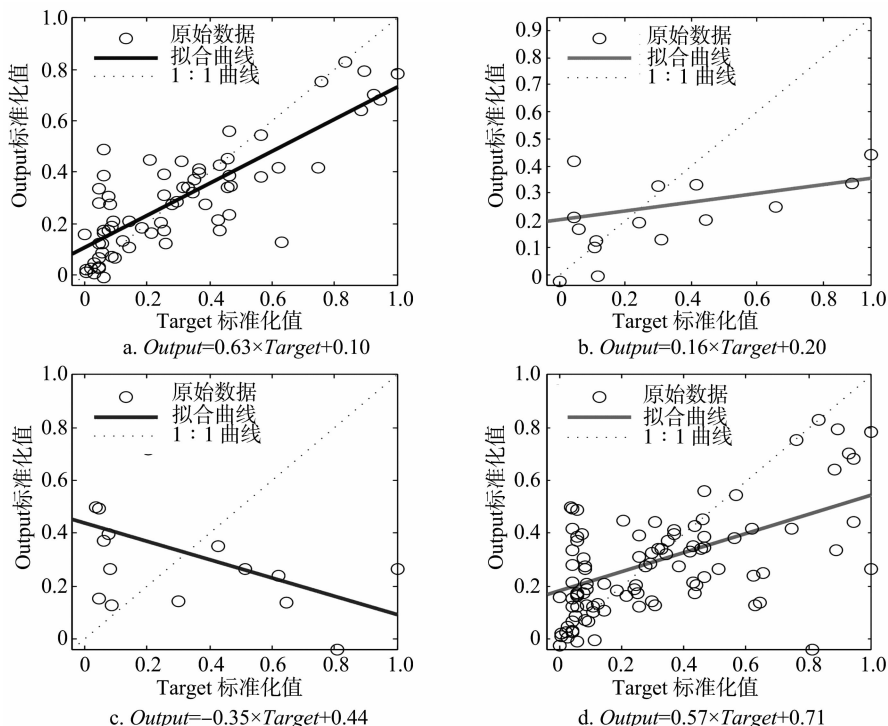


图7 应用氮、磷等养分流失潜力实测数据构建的 BP 神经网络模型

21.22% ~ 55.41%、总磷为 67.67% ~ 83.70%^[14]。虽然提高排水堰高度田面水中的 TN、TP 浓度有所降低,但不能降低其潜在流失量。控水滞排至施肥 5 ~ 7 d 后,田面水中的 TN 和 TP 流失量较少。从排水方式看,土壤耕整后先采取控水至 9 cm 或 6 cm 的深度,然后再排水至 3 cm 控水深度的排水方式模拟稻田田面水中的 TN、TP 流失量,总体上可分别减少 33.33% ~ 50.00%、34.48% ~ 50.00%^[17]。

综上所述,就本试验的春耕稻田 TP 和 TN 流失潜力而言,施用单质混合肥,进行蓄水 9 cm 处理,并滞水至施肥后 5 d 排干田面水是一种清洁的水分管理模式。同时,利用氮、磷等养分流失潜力的实测数据,构建 BP 神经网络模型,得出基于面肥种类、蓄水深度以及动态时间的春耕稻田养分流失潜力的拟合预测模型为 $Output = 0.57 \times Target + 0.71$, $r^2 = 0.56991$ 。

参考文献:

- [1] 丁 孟,杨仁斌,冯国禄,等. 微区模拟控排水条件下田面水氮磷流失特征及其减排效能研究[J]. 江西农业学报,2010,22(5): 122 - 124.
- [2] 朱兆良. 稻田土壤中氮素的转化与氮肥的合理施用[J]. 化学通报,1994(9): 15 - 17,22.
- [3] Tilman D, Fargione J, Wolff B, et al. Forecasting agriculturally driven global environmental change[J]. Science, 2001, 292(5515): 281 - 284.
- [4] 张志剑,王兆德,姚菊祥,等. 水文因素影响稻田氮磷流失的研究进展[J]. 生态环境,2007,16(6): 1789 - 1794.
- [5] 闫百兴,邓 伟,汤 洁. 松嫩平原西部稻田回归水中污染物的输出规律[J]. 上海环境科学,2002,21(10): 583 - 587,643.
- [6] 张荣社,周 琪,张 建,等. 潜流构造湿地去除农田排水中的氮的

- 研究[J]. 环境科学,2003,24(1): 113 - 116.
- [7] Zhang Z J, Zhang J Y, He R, et al. Phosphorus interception in floodwater of paddy field during the rice - growing season in TaiHu Lake Basin[J]. Environmental Pollution, 2007, 145(2): 425 - 433.
- [8] 张志剑,朱荫泥,王兆德. 受水浆管理措施影响的水田磷素流失特征与规律[C]//全国土壤污染控制修复与盐土改良技术交流会,2006: 288 - 292.
- [9] Takeda I, Fukushima A. Long - term changes in pollutant load outflows and purification function in a paddy field watershed using a circular irrigation system[J]. Water Research, 2006, 40(3): 569 - 578.
- [10] 丛沛桐,祖元刚,王瑞兰,等. GIS 与 ANN 整合技术在森林资源蓄积量预测中的应用[J]. 地理科学,2004,24(5): 591 - 596.
- [11] Ermini L, Catani F, Casagli N. Artificial neural networks applied to landslide susceptibility assessment[J]. Geomorphology, 2005, 66(1/2/3/4): 327 - 343.
- [12] Yabunaka K I, Hosomi M, Murakami A. Novel application of a back - propagation artificial neural network model formulated to predict algal bloom[J]. Water Science and Technology, 1997, 36(5): 89 - 97.
- [13] 国家环境保护总局.《水和废水监测分析方法》编委会. 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.
- [14] 冯国禄,杨仁斌,丁 孟,等. 模拟稻田中氮磷的变化特征及其降污潜力分析[J]. 生态环境学报,2010,19(7): 1636 - 1641.
- [15] 廖海玉. 稻田田面水中氮磷时空分布及其控水减排效能研究[D]. 长沙:湖南农业大学,2011.
- [16] 王秀娟,朱建强,姚佳佳,等. 施肥后稻田田面水的养分变化特征[J]. 长江大学学报(自然科学版),2013,10(17): 1 - 4.
- [17] 冯国禄. 减排降污控制稻田面源污染物排放总量的技术研究[D]. 长沙:湖南农业大学,2011.