

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第33卷 第5期 Vol.33 No.5 **2013**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 33 卷 第 5 期 2013 年 3 月 (半月刊)

目 次

前沿理论与学科综述

- 氮沉降对森林土壤有机质和凋落物分解的影响及其微生物学机制..... 王晶苑,张心昱,温学发,等 (1337)
- 工业大麻对重金属污染土壤的治理研究进展..... 梁淑敏,许艳萍,陈 裕,等 (1347)
- 最佳管理措施评估方法研究进展..... 孟凡德,耿润哲,欧 洋,等 (1357)
- 灌木年轮学研究进展..... 芦晓明,梁尔源 (1367)

个体与基础生态

- 华北落叶松夜间树干液流特征及生长季补水格局..... 王艳兵,德永军,熊 伟,等 (1375)
- 土壤干旱胁迫对沙棘叶片光合作用和抗氧化酶活性的影响..... 裴 斌,张光灿,张淑勇,等 (1386)
- 湖北石首麋鹿昼间活动时间分配..... 杨道德,李竹云,李鹏飞,等 (1397)
- 三种杀虫剂亚致死浓度对川硬皮肿腿蜂繁殖和搜寻行为的影响..... 杨 桦,杨 伟,杨春平,等 (1405)

种群、群落和生态系统

- 三沙湾浮游动物生态类群演替特征..... 徐佳奕,徐兆礼 (1413)
- 滇西北高原纳帕海湿地湖滨带优势植物生物量及其凋落物分解..... 郭绪虎,肖德荣,田 昆,等 (1425)
- 安徽新安江干流滩涂湿地草本植物区系及物种多样性 杨文斌,刘 坤,周守标 (1433)
- 湿地芦苇根结合好气细菌群落时空分布及其与水质因子的关系 熊 薇,郭逍宇,赵 霏 (1443)
- 三种温带树种叶片呼吸的时间动态及其影响因子..... 王兆国,王传宽 (1456)
- 不同土壤水分条件下杨树人工林水分利用效率对环境因子的响应..... 周 洁,张志强,孙 阁,等 (1465)
- 不同生态区域沙地建群种油蒿的钙组分特征 薛莘莘,高玉葆,何兴东 (1475)
- 藏北高寒草甸植物群落对土壤线虫群落功能结构的影响 薛会英,胡 锋,罗大庆 (1482)
- 铜尾矿废弃地土壤动物多样性特征..... 朱永恒,沈 非,余 健,等 (1495)
- 环丙沙星对土壤微生物量碳和土壤微生物群落碳代谢多样性的影响 ... 马 驿,彭金菊,王 芸,等 (1506)
- 基于生态水位约束的下辽河平原地下水生态需水量估算 孙才志,高 颖,朱正如 (1513)

景观、区域和全球生态

- 佛山市高明区生态安全格局和建设用地扩展预案..... 苏泳娴,张虹鸥,陈修治,等 (1524)
- 不同护坡草本植物的根系特征及对土壤渗透性的影响 李建兴,何丙辉,湛 芸 (1535)
- 京沪穗三地近十年夜间热力景观格局演变对比研究..... 孟 丹,王明玉,李小娟,等 (1545)
- 窟野河流域河川基流量变化趋势及其驱动因素..... 雷泳南,张晓萍,张建军,等 (1559)
- 模拟氮沉降条件下木荷幼苗光合特性、生物量与 C、N、P 分配格局..... 李明月,王 健,王振兴,等 (1569)
- 铁炉渣施加对稻田甲烷产生、氧化与排放的影响 王维奇,李鹏飞,曾从盛,等 (1578)

资源与产业生态

- 食用黑粉菌侵染对茭白植株抗氧化系统和叶绿素荧光的影响..... 闫 宁,王晓清,王志丹,等 (1584)

佛手低温胁迫相关基因的差异表达..... 陈文荣,叶杰君,李永强,等 (1594)

美洲棘蓟马对不同蔬菜寄主的偏好性..... 朱 亮,石宝才,官亚军,等 (1607)

茉莉酸对棉花单宁含量和抗虫相关酶活性的诱导效应 杨世勇,王蒙蒙,谢建春 (1615)

造纸废水灌溉对毛白杨苗木生长及养分状况的影响..... 王 焯,席本野,崔向东,等 (1626)

基于数据包络分析的江苏省水资源利用效率..... 赵 晨,王 远,谷学明,等 (1636)

研究简报

太岳山不同郁闭度油松人工林降水分配特征..... 周 彬,韩海荣,康峰峰,等 (1645)

基于 TM 卫星影像数据的北京市植被变化及其原因分析 贾宝全 (1654)

薇甘菊萎蔫病毒感染对薇甘菊光合特性和 4 种酶活性的影响..... 王瑞龙,潘婉文,杨娇瑜,等 (1667)

第七届现代生态学讲座、第四届国际青年生态学者论坛通知 (I)

中、美生态学会联合招聘国际期刊主编 (i)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 338 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 34 * 2013-03



封面图说:美丽的油松松枝——油松又称红皮松、短叶松。树高可达 30m,胸径达 1m。其树皮下部灰褐色,裂成不规则鳞块;针叶 2 针一束,暗绿色,较粗硬;球果卵形或卵圆形,长 4—7cm,有短柄,与枝几乎成直角。油松适应性强,根系发达,树姿雄伟,枝叶繁茂,有良好的保持水土和美化环境的功能,是中国北方广大地区最主要的造林树种之一,在华北地区无论是山区或平原到处可见,人工林很多,一般情况下在山区生长最好。在山区生长的油松,多在阴坡、半阴坡,土壤湿润和较肥沃的地方。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201210231468

孟凡德, 耿润哲, 欧洋, 王晓燕. 最佳管理措施评估方法研究进展. 生态学报, 2013, 33(5): 1357-1366.

Meng F D, Geng R Z, Ou Y, Wang X Y. A review for evaluating the effectiveness of BMPs to mitigate non-point source pollution from agriculture. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(5): 1357-1366.

最佳管理措施评估方法研究进展

孟凡德¹, 耿润哲¹, 欧 洋², 王晓燕^{1,*}

(1. 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048;

2. 中国科学院东北地理与农业生态研究所湿地生态与环境重点实验室, 长春 130012)

摘要: 针对流域非点源污染的关键源区, 进行最佳管理措施(BMPs)的配置, 是非点源污染控制的有效途径。污染削减效率的准确识别对于 BMPs 在目标流域内的有效实施具有非常重要的意义。通过综合对比和分析实地监测、养分平衡、风险评估以及模型模拟等四类最佳管理措施评估方法的有效性、特点、适用条件及其局限性, 得出以下结论: 养分平衡法较为简便且易于使用, 相较于其他方法, 所需时间短且又可以消除评估效果的滞后效应, 但对污染物削减的时间效应和传输过程影响考虑较少。风险评估和模型模拟方法可以更好地应对不同时空尺度下削减措施效率的评估, 但需要大量实测数据的支持, 同时模型模拟中普遍存在的时空不确定性影响很难消除。由于各种评估方法都有一定的适用条件, 单一方法难以有效地完成评估目标, 需要综合应用各类方法, 才能最大程度地发挥这些方法的潜在功能和有效性, 进而实现 BMPs 措施使用的成本-效益目标。

关键词: 最佳管理措施(BMPs); 养分平衡; 风险评估; 非点源污染模型

A review for evaluating the effectiveness of BMPs to mitigate non-point source pollution from agriculture

MENG Fande¹, GENG Runzhe¹, OU Yang², WANG Xiaoyan^{1,*}

1 College of Resources, Environment & Tourism, Capital Normal University, 100048 Beijing, China

2 Key Laboratory of Wetland Ecology and Environment, Northeast Institute of Geography and Agricultural Ecology, Chinese Academy of Sciences, 130012 Changchun, China

Abstract: The nonpoint source pollution can be controlled by implementing various best management practices (BMPs) in the watershed. However, before such practices are adopted, their effectiveness at various spatial and temporal scales must be evaluated. Though the effectiveness of individual BMPs has been usually assessed in standard plots, it is necessary to quantify the impact at a wider range (eg. at the watershed scale) to ensure that practices taken will be sufficient to meet EPL (the environmental protection law) targets. In this paper, we compare the characteristics and suitability of different approaches (direct measurement, nutrient budgeting, risk assessment and model simulation) to assess the effectiveness of actions to mitigate sources and transport of nitrogen (N) and phosphorus (P) from agricultural land to water. Nutrient budgets are most commonly used to quantify nutrient management by evaluating inputs and outputs over a defined time period. Automatic calculations under spreadsheets or other user friendly interfaces are used as accounting procedures to obtain the nutrient surplus or deficit values. System boundaries are flexible, resulting in a range of methodologies applicable from plot to national scale including farm gate, soil surface and soil system budgets. The limitation of this method that it currently fail to consider the timing and transport aspects of mitigation and assume a direct causal relationship between

基金项目: 科技部中德政府间科技合作项目(2009DFA92440); 国家科技支撑计划项目(2011BAD31B01); 国家自然科学基金项目(40971258, 41271495, 41201534)

收稿日期: 2012-10-23; **修订日期:** 2013-01-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: cnuwxy@gmail.com

potential and actual nutrient loss. Risk assessment procedures quantify the risk of nutrient loss occurring based on the likelihood of nutrient availability and delivery processes coinciding. Small areas may contribute disproportionately large amounts of nutrients and, by ranking vulnerability to loss, mitigation can be targeted to those areas at highest risk. The approach is most applicable to P loss which is explained by annual variations in runoff and the associated erosion of P enriched soils. But assessments demand increased availability of data, and there is a large degree of uncertainty associated with their spatial and temporal dimensions which is difficult to validate adequately. Models are potentially more comprehensive and able to better reflect choice of mitigation at a range of scales. Nevertheless, model calibration and validation is expensive and requires expertise to perform. Large datasets are required for validation which is essential to confirm their ability to quantify actual loss. Monitoring data usually cannot meet the requirement to develop fully distributed models, which decreases the ability to simulate the mechanism of pollutant mitigation in a precise location in catchment with confidence. The disadvantages of individual approaches indicated that these assessment methods should be integrated to maximize their potential usefulness and positive attributes. These will make nutrient inputs utilized most efficiently and site specific actions to reduce nutrient transport and delivery can be targeted at most cost effectively at various scales. Such an integrated decision support system will also more effectively involve the farmers to join the planning of BMPs.

Key Words: BMPs; nutrient budgets; risk assessment; models

最佳管理措施(Best Management Practices, BMPs)是控制农业非点源污染最为常用与有效的途径^[1]。它可以通过对污染物来源、传输过程以及进入受纳水体的三个环节进行控制^[2]。例如,其对污染源的控制主要是通过控制营养物质施用量和提高肥料利用率等方法实现^[3]。污染物类型不同,采取的防控措施也各有不同。如对硝酸盐控制可以通过限制营养物质的使用和提高利用效率来控制其进入土壤,最大化地降低其输出量。对磷的输入控制则由于土壤缓冲作用的影响,要持续较长时间才可能见效^[4]。同时由于磷与土壤表层之间存在着密切的关系,还需要解决土壤对颗粒态污染物的吸附、解吸附以及传输路径等多种问题,才能最终实现对磷污染的有效控制。

BMPs 控制效率的评估是决定措施是否适用的关键步骤。全面考察 BMPs 组合措施的环境效应、成本-效益情况需要采用一系列的评估方法,已有研究多集中于单个措施的评估,大尺度 BMPs 组合削减效率评估研究还不多见^[5-7]。目前主要采用的评估方法细分为四大类:实地监测、养分平衡理论、风险评估、模型模拟^[8]。其中实地监测多以田块或河流断面污染物浓度为措施效率评价指标,能够为环境管理部门提供基础数据;养分平衡则采用营养盐在农田或流域尺度的盈余状况作为评价标准衡量污染物来源变化对于非点源污染产生的影响;风险评估主要以磷素流失潜在风险值作为判断措施实施后是否有效的依据,多以田块作为研究对象;模型模拟最为关注 BMPs 措施对流域尺度污染负荷的影响,其结果较为直观,但操作较为复杂。近年来采用上述各类方法的研究较多,但尚无各类方法适用条件及优缺点的系统总结,因此本文将着重探讨实地监测、养分平衡、风险评估以及模型模拟等四类最佳管理措施评估方法的有效性、特点、适用条件及其局限性,为我国开展非点源污染控制及 BMPs 削减效率评估工作提供参考^[8]。

1 评估方法

1.1 实地监测

水体中较长时间序列的营养物质浓度和负荷的实地监测数据是最能够表征削减措施效率的依据,这些数据还能够描述 BMPs 对流域水质和生态功能的实际改善情况。获取这些数据的方法主要包括采用嵌套式监测法,先在小流域尺度上(300—2500 hm²)进行实地监测活动,然后将其结果进行适当的尺度转换放大化为下一级的流域尺度进行使用(2000—5000 hm²);通过采集土壤样品来评估根层土壤中营养物质的流动对受纳水体的影响;通过从水系上游至下游全程监控来确定缓冲带的效率等。但由于非点源污染的复杂性和营养物系统动力学方面的研究(营养物在河流中的运移过程和生态响应方面)还不完善,因此对于削减措施效果的正

负效应,目前应用监测方法还没有明确的研究结果。同时,年际间的气候变化又增加了实地监测的复杂性,使得从复杂的水环境问题中区分削减措施的效率变得更加困难^[9-12]。针对这些情况,当前主要是通过使用自动样品分析和采集设备,来提高实测样品数据的重现性,以便能够获取更具代表性的评估结果^[10]。目前采用实地监测的方法对 BMPs 措施的效率评估还存在以下问题:

(1) 对大尺度流域 BMPs 削减效率进行评估,需要高精度的时空数据以及对管理方式改变灵敏度较高的样本点数据。目前只有欧美等少数国家具有详尽的长时间序列连续监测数据可以使用,因此数据的可得性是限制实地监测评估法广泛使用的主要瓶颈^[13]。

(2) BMPs 措施作用的滞后性对监测方法的评估效果也会产生很大的影响,一方面加大了数据的需求,同时还可能导致在规定时间内达不到水质目标值。例如,Silgram 等 2005 年在英格兰硝酸盐敏感区域采用削减措施后,有近半数措施的时间滞后性可能达 60a 之久^[14],钻井中硝酸盐的浓度在 58—131a 之后才可能下降 50%^[15]。

(3) 土壤类型、泥沙、生物滞留以及反复释放过程对措施效果的阻碍及抵消作用也是监测方法难以辨识的^[16]。如颗粒态磷会随泥沙滞留过程沉积下来,但随后又会随生物和非生物过程被反复吸附和释放。由于过量施肥造成的土壤中营养元素的过量积聚,使得污染物在很长一段时间内持续释放,导致以源控制为主的削减措施效果难以监测^[5,13,17]。因此,在使用实地监测方法时,需要考虑措施效率发挥的迟滞性和水体自身修复功能所带来的影响^[18-20]。

直接进行实地监测是一种有效的评估方法,但由于营养物质污染源、流失以及传输途径的时空异质性,该方法在大尺度区域几乎无法应用,而多适用于小尺度区域,这就需要在在大尺度区域建立一些替代的评估方法。

1.2 养分平衡

养分平衡是对营养元素进行量化管理时最常用的方法之一,是基于物质守恒原理,通过对研究区域内氮素输入与输出进行量化来实现的。该方法的适用尺度较为广泛,从田块到国家尺度的大多数研究区域均可应用。根据研究尺度和研究目的的不同,国外学者总结了 3 种养分平衡模型,即场域平衡、土壤表观平衡及土壤系统平衡。

场域养分平衡模型是以农场为研究对象,将农场里所有养分输入和输出都通过“农场门”这个假定的输入输出端口进行氮素流动的核算。如评价氮肥管理对环境的影响时,可以基于农场系统的氮素盈亏进行^[21]。“土壤表观”养分平衡模型,主要用来计算土壤作物根际深度的养分平衡,侧重于考虑物质在土壤表面输入输出通量,不涉及土壤内部的转化。该方法操作简便,能估算区域尺度上养分的环境影响负荷。刘曦等以土壤表观氮素平衡模型为基础,建立了 1991—2004 年北京市通州区农田氮素平衡核算的框架和数据库,利用地理信息系统(GIS)技术对该区域氮素平衡强度及特征进行了分析。土壤表观养分平衡模型是核算农田系统的养分平衡状况的主要方法,其主要通过辨别农田生态系统内的养分盈亏状态,来分析农业生产和农业环境状况^[22]。土壤系统平衡是以大尺度区域为研究对象,揭示盈余养分在研究区域中的分布状况,是一种常用的宏观养分平衡模型。该模型除了考虑以上两种模型中的输入和输出项目外,还把地表径流、淋失和矿化作用纳入模型中,使土壤系统养分平衡模型更适用于宏观尺度的研究。

养分平衡理论用于评估 BMPs 的效率主要受到以下几个方面因素的制约:

(1) 数据的可用性直接决定了养分平衡评价方法的适用尺度^[23]。养分平衡方法特别适用于能够确定农场系统和涉益者之间关系的农场的研究。污染物来源与传输过程时空异质性表明来自于田块盈余量的预测结果,不适用于更大的研究区尺度。与之相反,通过使用低精度数据所估算的大尺度区域盈余量也不能用来去推测单体农场的盈余量^[24]。

(2) 盈余量和流失量之间关系的不确定性对养分平衡理论应用有较大影响。该理论既没有考虑饱和土壤中的营养物质释放量,对营养物质滞留与长期盈余量的识别也不够灵敏^[25]。同时存在淋溶作用发生在作物对营养物的吸收时间之前的可能,这也会导致营养物质盈余量与流失量之间关系的减弱^[26-29]。

(3) 利用养分平衡理论进行估算时产生的误差也会使 BMPs 效果评估的准确性下降^[30]。养分平衡理论对于复杂多变的农业系统的解释和简化^[31]。由于其所需输入数据在来源和精度上存在一定的差异,因此其中所存在的误差也不易得知。例如:粪肥中营养物质组成差异很大,很难获取有代表性样品,导致氮的含量估算误差很大,从而造成粪肥输入和输出计算结果存在较大的不确定性;欧盟在对牧草产量和氮去除进行实际调查后发现由于缺乏饲料与样品实测数据,土壤表层系统中氮的含量存在很大的不确定性^[32]。因此,场域养分平衡通常被认为比土壤表层和土壤系统的平衡更加精确。

1.3 风险评估

污染负荷在空间上通常呈正态分布或对数正态分布^[33],即仅占流域面积百分之几的区域贡献了大部分的污染物,这些区域被称为非点源污染的关键源区^[34]。风险评估法主要是通过估算污染物产生与运移发生的概率,量化非点源污染发生的风险,从而识别关键源区^[35]。该评价体系由美国学者 Lemunyon 等在综合考虑多因子及其相互作用对磷流失的影响后构建而成,采用的评价工具为磷指数(PI)^[36]。该法选取土壤侵蚀、地表径流、土壤有效磷、化学磷肥和有机磷肥的施用量和施用方法等 8 个因子构建评价指标体系,根据每个因子测定值将其划分为 5 个等级(无、低、中、高、极高),每个等级对应一个等级值(0、1、2、4、8)并赋予每个因子相应的权重,按如下公式进行计算^[37-39]:

$$PI = \sum (W_i \times V_i)$$

式中, W_i 为各个影响因子(包括源因子和迁移扩散因子)的权重, V_i 为各因子的等级值。最后将计算的磷指数从小到大分为 4 类风险等级(低、中、高、很高),从而获得研究区域的磷流失潜在风险空间分布,界定出磷流失高风险区的位置和范围。

近年来,又有学者对磷指数进行了改进,将源因子和运移因子赋予了权重值,这使得该方法能够通过调整权重值来使其适合于某个特定的区域且不需要扩展某些特定的参数^[39]。但受限于体系架构的限制,该类方法在应用过程中也存在一些问题:

(1) 通过调整源因子、运移因子类型及参数,可模拟源控制及传输过程控制为主的 BMPs 的实施效果。但是对以年为时间步长的种植活动和饲养活动的 BMPs 控制效果进行准确评估则较为困难^[37-38]。例如:粪肥渗入的时滞性、粪肥施用时间和各次播种之间的间隔时间都会对评估结果产生影响。因此,丹麦在应用磷指数法时,对每年 4—10 月和 11—翌年 3 月之间的施肥量进行了区分,以消除粪肥使用时间的时间性影响^[40]。

(2) 风险评估可以在没有实地监测数据的情况下反映污染物传输过程对于非点源污染形成的影响,却通常被一些结构和参数的不确定性所影响^[41]。通过增加敏感因子及参数数量,可以改善这一现象,但却导致数据需求与该方法的设计初衷产生矛盾^[42]。同时,由于流域内磷的迁移转化过程非常复杂,将其概化较为困难,因此磷指数法还主要应用于农田和小流域尺度^[18]。

(3) 磷指数值只是磷流失的潜在风险值,并不是实际的磷流失量,这将直接影响到风险区域确定的合理性^[43]。另外,在因子权重的确定、风险等级的划分等环节还缺乏统一的标准,带有一定的主观性,会影响污染指数法的计算以及关键源区的识别结果^[44]。

风险评估法应用较为广泛。如非点源潜在污染指数方法是一种基于地理信息系统的流域尺度上的污染评价工具。通过计算可以得到流域内每个土地单元的非点源潜在污染指数值,代表该单元对河流水体造成的潜在非点源污染,从而给决策者和公众提供对水环境产生潜在影响的非点源污染及影响的空间分布信息。Cecchi 等采用非点源潜在污染指数法在意大利境内 Tiber 流域和 Viterbo 省得到成功应用^[45];武晓峰等在引入欧洲学者建立的潜在非点源污染指数模型的基础上,根据我国的社会经济条件和流域状况,进行了土地利用类型扩展、土地利用类型比对和土壤渗透性等级划分等 3 个重要改进,建立了一个评价流域污染负荷分布的潜在污染指数模型并在北京市密云水库流域典型的 3 个小流域——曹家路、黄土坎和蛇鱼川进行了初步应用和分析验证。研究表明,改进后的潜在污染指数模型能够综合考虑养殖场、旅游区等各种潜在非点源污染对河流水质的潜在污染影响,可用于评价流域内各种非点源污染对河流造成的潜在污染的空间分布^[46]。

1.4 模型模拟

模型模拟一般采用能够描述物理机制的经验方程来对营养物质的传输、滞留以及转化过程进行定性、定量的评估^[42,47]。许多模型中还包含有优化选项,能够在指定控制目标下确定污染物输入和输出之间的关系。现有模型按照其复杂性可分为经验模型、综合模型以及过程驱动模型^[48-49]。

经验模型对于污染物输入输出的模拟是通过采用一种所谓“黑箱”的方法,并不考虑污染物的迁移转化过程。该类模型对数据的要求较低,因此能够评估的削减措施数量有限,但对于在区域尺度上研究具有重要的用途。概念性模型虽包含部分污染物运移转化过程信息,并且有大量的实验数据来支持,但并不能模拟完整的污染物运行机制过程。模型所需的系数种类和数量比经验模型中要多,能用于识别营养物质流失高风险区并在相对有限的条件下对一系列削减措施方法进行评估^[50]。

机理模型着眼于污染物流失全过程的量化,可以识别污染高风险区和营养物质的流失路径,使管理人员能够更有针对性的采取相应削减措施^[51]。但这类模型计算量较大,且对使用人员的专业知识要求比较高,同时还需要大量数据支撑^[52-53]。以流域水土评估模型(SWAT)为例,Panagopoulos 等首先利用敏感性分析方法识别了希腊 Arachthos 流域内不同 BMPs(免耕、灌溉、放牧改变、平衡施肥、等高种植、带状种植等)所对应的模型内部参数,主要集中在标准径流曲线数模型径流模块,以及土壤模块内,这些关键参数也可称为削减措施模拟因子,接着根据不同情景设置方案,调整各类参数,最终实现了对不同的削减措施的模拟。但由于模拟结果受季节和降雨强度影响较大,还存在一定的不确定性^[54]。

模型模拟对 BMPs 削减措施效果的模拟还存在以下问题:

(1)从理论上说,如果模型能够对某种 BMP 去除污染物的机制进行模拟,就能够很准确的评价 BMPs 的效果^[55]。但是,实际上目前模型能够较为准确评价的只有轮作、保护性耕作及施肥管理这三大类措施,这些措施都是调整模型的某个单一参数,就可以进行评价。但是对于常用的植被过滤带措施,调整单一参数就很难进行有效评价,因为过滤带设计中不仅要考虑宽度、糙度等因子,污染物运移路径也是很重要的。因此常用的流域水土评估模型、流域水文水质模拟模型(HSPF)等模型很难精准的评价这一措施的效果^[56]。

(2)随着计算机技术的发展,非点源污染模型的模拟尺度不断增大,可以模拟由几千个小流域组成的大尺度流域,也可以在子流域尺度对 BMPs 进行有效的目标配置。但受模型结构设计影响,现有 BMPs 的目标配置只能在水文响应单元尺度实施^[54]。水文响应单元是以地形、土地利用及土壤类型为依据划分的一种模型运算基本单元,其边界与天然农田地块常常不一致,以此为基础的 BMPs 配置方案,通常难以被农户接受,实际操作性较差。

(3)模型结构复杂、数据需求繁多且参数间相互影响,从而模拟结果通常具有显著的不确定性。例如:由于分布式水文模型未考虑土壤对污染物浓度变异的缓冲作用、长期耕作带来的遗留效应以及气候变化的影响,美国威斯康辛州的研究发现,在大规模实施 BMPs 后,虽然模型估算结果表明非点源污染物削减非常明显,但是实地监测发现大部分河段水质并未发现统计学意义上的显著改善^[57]。流域尺度模型所具有的内在的不确定性,同时受空间数据精度和数据需求所限制。因此,对于流域尺度到国家尺度的模拟,可能经验性的模型是更加适用的,受限制的机制模型更适用于地块尺度的模拟^[58-59]。

1.5 综合评估

根据非点源污染的发生特点,很多区域都同时采用了多种 BMPs 措施以达到污染控制目的,环境管理部门通常也需要得到田块及流域尺度的削减措施效果,因此单一评估方法难以对其进行效率评估,需要将各类方法联合起来才能应对这一问题^[60]。此外,同时应用多种方法,还可以通过模拟结果的比对来提高可信度。从上文分析中可以看出不同评估方法对于 BMPs 效率的评估体现出不同的特点(表1)。各类方法都有自己的优点和局限性(表2),因此其适用性也存在较大差异(表3)。如何有效的将各种方法整合在一起进行综合评估已成为近年来相关研究的热点。大量已有研究表明,方法集成过程中实地监测是必须的一个模块,在此基础上科研人员根据研究目的的差异进行不同评估方法的组合才会达到预期目标。例如,Brown 等以氮循环

模型模拟结果为数据来源,进行了场域平衡估算,最终通过编程设计出了一种农田施肥决策支持系统^[48]。Oenema 等为考察源削减对河流水质的影响,首先利用营养平衡模型估算了小尺度研究区营养盐的盈余,接着将这一数据带入到河流水质模型中,进而预测了不同施肥方式对河道内生态系统的影响^[61]。国内关于 BMPs 效率评估方法的集成研究尚处于初步阶段,大多仅是进行方法的简单并用,如 Hong 等以流域水土评估模型为基础采用“小流域推广法”对长江流域的非工程性 BMPs 的效率进行评估,但是对于工程性 BMPs 的效率则采用了查阅资料法获取^[62]。

表 1 各种评估方法特点总结^[8]
Table 1 Summary of assessment method features

		评估方法 Assessment method			
		实地监测 Measurement	平衡理论 Budgets	风险评估 Risk Assessment	模型模拟 Models
削减效应	源头控制 Source	Y	Y	Y	Y
Mitigation type	时间效应 Timing	Y		Y ^①	Y
	传输路径控制 Transport	Y		Y	Y
尺度 Scale	地块 Field	Y	Y	Y	Y
	农场 Farm	Y	Y	Y	Y
	流域 Catchment	Y	Y	Y	Y
	国家 National		Y		Y
复杂性	单一方法 Single method	Y	Y	Y	Y
Complexity	综合方法 Multiple methods	Y	Y ^②	Y ^③	Y
数据需求	地块 Field	中	低	低	中
	农场 Farm	中	低	低	中
	流域 Catchment	高	中	中	中到高 ^③
	国家 National	高	中	高	中到高 ^③
不确定性 ^④	地块 Field	低	中 ^⑤	低/中	中
Uncertainty ^④	农场 Farm	低	中 ^⑤	低/中	中
	流域 Catchment	中	中 ^⑤	中	高
	国家 National	高	高	高	高

①粪肥使用的时间性的重大改变有敏感性;②未给出多种削减措施的交互作用指标;③机制模型的数据需求超过了经验模型;④从污染源到时间性以及传输路径控制类型之间的不确定性是增加的;⑤假设从盈余量中能够估算流失量

表 2 各种评估方法的优点和局限性^[8]
Table 2 The benefits and limitations of assessment methods

评估方法 Assessment method	优点 Benefits	局限性 Limitations
实地监测 Measurement	是实际流失量而不是潜在流失量	需要长期监测来满足时间滞后性和缓冲作用的影响
	对所有削减措施都适用	成本昂贵
	适用于各种研究区尺度	场地特征对结果的影响
	难以同周围环境的影像中区分	
平衡理论 Nutrient budgets	数据获取受限制	
	计算简便	不适用于磷
	易于调整	对于时间性和传输路径类措施不敏感
	数据需求低	同营养物质账户系统不一致
	数据易于获取	参考数据较少
	鼓励营养物质使用的意识增强营养物质利用效率	输入数据不确定性
	增加农民对于削减措施的接受度	粪肥和饲料中 N 的含量不确定
	目标削减措施评估	不能预测实际流失量

续表		
评估方法 Assessment method	优点 Benefits	局限性 Limitations
风险评估 Risk assessment	监测点改变并且量化农户行为	营养物使用效率对于农场系统有影响
	低成本	
	对削减措施有响应	
	适用于各种尺度	
	对于源控制为主要削减机制的削减措施有响应	
	提供风险的粗略估计	模拟潜在流失量
	考虑可变的污染区域	不适用于 N
	对于 P 的污染源控制和传输路径控制措施的反应较好	对于时间性的较小改变不敏感
	能够使用当地的环境	输入数据不确定性
	提升较高的目标削减措施	参数不确定性
模型模拟 Modelling	适用尺度地块到流域	结构不确定性
	数据需求低	
	数据易于获取	
	易于使用并考虑利益相关者	
	实际流失量的模拟	机制性模型运算需要专业人员来进行操作
	相比于经验模型和概念性模拟较低并且易于获取的数据需求	数据需求较大
	能够模拟所有削减措施(机制性模型)	半分布式模型不能够模拟精确的削减措施位置
	能够模拟污染源类措施(经验模型)	校准所需的是实际流失量而不是潜在流失量
	传输路径以及高风险区的确定	输入数据不确定性
	对于 P 和 N 的所有削减措施均适用——机制性模型	参数不确定性
	对于 N 和 P 的所有非点源污染和传输路径控制措施均适用——概念性模型	结构不确定性
	对于 N 和 P 的污染源类控制措施适用——经验模型	削减因子需要重新设定
	能够提供长期和短期评估	不易于使用
	可通过调整参数来对削减措施进行模拟	未考虑利益相关者

表 3 评估方法对不同尺度削减措施的适用性^[8]

Table 3 Suitability of assessment methods for evaluations of mitigation at a range of scales				
尺度 Scale	评估方法 Assessment method	削减效果 Mitigation type		
		源变化 Source	时间效应 Timing	传输路径阻断 Transport
地块尺度 Field	实地监测 Measurement	Y	Y	Y
	平衡理论 Budgets	Y		
	风险评估 Risk assessment			Y ^①
	模型模拟 Models		Y	
农场尺度 Farm	实地监测 Measurement	Y	Y	Y
	平衡理论 Budgets	Y		
	风险评估 Risk assessment			Y ^①
	模型模拟 Models		Y	
流域尺度 Catchment	实地监测 Measurement			
	平衡理论 Budgets	Y		
	风险评估 Risk assessment			Y ^①
	模型模拟 Models	Y	Y	Y
国家尺度 National	实地监测 Measurement			
	平衡理论 Budgets	Y		
	风险评估 Risk assessment			
	模型模拟 Models		Y	Y

① 表示仅针对于磷污染

2 研究展望

(1) 为了满足流域水质管理目标的要求, 需要有合适的评估方法来对非点源污染物削减措施的效率进行评估。研究区的环境、农业生产活动的特点、营养物质、削减措施的类型、数据的可获取性等都会对评估方法的应用产生影响。由于成本限制和削减措施效果滞后性的影响, 实地监测更适用于小尺度研究区, 对大尺度区域而言, 模型模拟是更加适用的。养分平衡理论适合于评估氮的流失, 风险评估方法则更适用于对磷污染控制措施的评估。根据研究目的、尺度、不确定性程度并结合所要评估的削减措施来决定适用的评估方法是未来研究发展的必然趋势。

(2) 养分平衡法: 今后应当提升该方法对控制措施时间效应评估的敏感性。主要针对短时间步长, 并增加对土壤中氮转化的模拟能力, 同时土壤本底值和营养物质矿化和固化的影响也不应忽视。营养物质施用方法的改进也是显著降低平衡方程估算不确定性的发展趋势。针对盈余量估算精度方面, 需大量采用农户信息记录系统、标准化估算方法和具有参考意义的案例。在方法实际应用方面需要识别降雨量、土壤磷饱和度等环境影响因子和修正因子对养分盈余与流失关系的影响。

(3) 风险评估类方法: 今后应在对权重值本地化并校准之后, 进一步改进模型模拟结果与实际流失量之间的一致性; 同时为了使其能够对污染高风险区进行模拟, 还应提高其对削减措施时间效应的敏感性。

(4) 模型模拟: 降低模型结构和参数的不确定性是未来研究的重点, 这需要对污染物在整个流域内的传输过程和连通性进行系统研究, 并在此基础上建立实验数据库以改善模拟结果的代表性和对 BMPs 措施削减措施量化的表征功能。为了使模拟结果能够达到可接受的不确定性水平同时应扩展模型的适用性尺度, 需要对模型进行全面验证, 但这也需要较高的实地监测费用。

(5) 在考虑资源利用有效性以及涉益者参与的情况下, 目前还没有一种评估方法能够对各种尺度下的所有削减措施进行合理的评估。但简单的联合估算效果有限, 因此需要将这些评估方法进行合理的系统整合以最大限度发挥各种方法的潜力和优点。例如将养分平衡和模型模拟进行结合, 实现对 BMPs 措施不同尺度效应的评估, 当然这也需要补充必要的实地监测工作以降低模型结合所带来的不确定性影响, 是一项非常值得尝试的研究工作。

References:

- [1] Wang X Y. Study for the Non-Point Source Pollution Mechanism and Its Mitigation Management: A Case Study of Minyun Reservoir Watershed, Beijing. Beijing: Science Press, 2011: 287-290.
- [2] Zhang X Y, Zhang M H. Modeling effectiveness of agricultural BMPs to reduce sediment load and organophosphate pesticides in surface runoff. *Science of the Total Environment*, 2011, 409(10): 1949-1958.
- [3] Wang X Y, Zhang Y F, Ou Y, Yan Y M. Predicting effectiveness of best management practices for control of nonpoint source pollution—a case of Taishitun Town, Miyun County, Beijing. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, 29(11): 2440-2450.
- [4] Granlund K, Räike A, Ekholm P, Rankinen K, Rekolainen S. Assessment of water protection targets for agricultural nutrient loading in Finland. *Journal of Hydrology*, 2005, 304(1/4): 251-260.
- [5] Kronvang B, Jeppesen E, Conley D J, Sondergaard M, Larsen S E, Ovesen N B, Carstensen J. Nutrient pressures and ecological responses to nutrient loading reductions in Danish streams, lakes and coastal waters. *Journal of Hydrology*, 2005, 304(1/4): 274-288.
- [6] Cuttle S P, Macleod C J A, Chadwick D R, Scholefield D, Haygarth P M, Newall-Price P. An inventory of methods to control diffuse water pollution from agriculture: user manual. DEFRA project ES0203, 2007. [2012-10-23]. <http://www.defra.gov.uk/science/default.htm>
- [7] Rodriguez H G, Popp J, Maringanti C, Chaubey I. Selection and placement of best management practices used to reduce water quality degradation in Lincoln Lake watershed. *Water Resource Research*, 2011, 47: 1-13.
- [8] Cherry K A, Shepherd M, Withers P J A, Mooney S J. Assessing the effectiveness of actions to mitigate nutrient loss from agriculture: A review of methods. *Science of the Total Environment*, 2008, 406(1/2): 1-23.
- [9] Bechmann M E, Berge D, Eggestad H O, Vandsemb S M. Phosphorus transfer from agricultural areas and its impact on the eutrophication of lakes—two long-term integrated studies from Norway. *Journal of Hydrology*, 2005, 304(1/4): 238-250.
- [10] Harris G, Heathwaite A L. Inadmissible evidence: knowledge and prediction in land and riverscapes. *Journal of Hydrology*, 2005, 304(1/4): 3-19.
- [11] Lord E I, Anthony S G, Goodlass G. Agricultural nitrogen balance and water quality in the UK. *Soil Use and Management*, 2002, 18(4): 363-369.

- [12] Lord E, Shepherd M, Silgram M, Goodlass G, Gooday R, Anthony S G. Investigating the effectiveness of NVZ Action Programme measures: development of a strategy for England. Report for DEFRA project WT03017, 2007. [2012-10-23]. <http://www.defra.gov.uk/science/default.htm>.
- [13] Vagstad N, Stålnacke P, Andersen H E, Deelstra J, Jansons V, Kyllmar K, Loigu E, Rekolainen S, Tumas R. Regional variations in diffuse nitrogen losses from agriculture in the Nordic and Baltic regions. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2004, 8(4): 651-662.
- [14] Silgram M, Williams A, Waring R, Neumann I, Hughes A, Mansour M, Besien T. Effectiveness of the nitrate sensitive areas scheme in reducing groundwater concentrations in England. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 2005, 38(2): 117-127.
- [15] Collins A L, McGonigle D F. Monitoring and modelling diffuse pollution from agriculture for policy support: UK and European experience. *Environmental Science and Policy*, 2008, 11(2): 97-101.
- [16] Grizzetti B, Bouraoui F, de Marsily G, Bidoglio G. A statistical method for source apportionment of riverine nitrogen loads. *Journal of Hydrology*, 2005, 304(1/4): 302-315.
- [17] Iital A, Stålnacke P, Deelstra J, Loigu E, Pihlak M. Effects of large-scale changes in emissions on nutrient concentrations in Estonian rivers in the Lake Peipsi drainage basin. *Journal of Hydrology*, 2005, 304(1/4): 261-273.
- [18] Wriedt G, Rode M. Modelling nitrate transport and turnover in a lowland catchment system. *Journal of Hydrology*, 2006, 328(1/2): 157-176.
- [19] Wendland F, Bogena H, Goemann H, Hake J F, Kreins P, Kunkel R. Impact of nitrogen reduction measures on the nitrogen loads of the river Ems and Rhine (Germany). *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2005, 30(8/10): 527-541.
- [20] Stålnacke P, Grimvall A, Libiseller C, Laznik A, Kokorite I. Trends in nutrient concentrations in Latvian rivers and the response to the dramatic change in agriculture. *Journal of Hydrology*, 2003, 283(1/4): 184-205.
- [21] Leach K A, Allingham K D, Conway J S, Goulding K W T, Hatch D J. Nitrogen management for profitable farming with minimal environmental impact: the challenge for mixed farms in the Cotswold Hills, England. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 2004, 2(1): 21-32.
- [22] Liu X, C F, Cai W T, Tang H, Lei J. Surface nitrogen balance and analysis of spatial characteristics of farmland in Tongzhou District, Beijing. *Journal of China Agricultural University*, 2009, 14(2): 52-58.
- [23] Withers P J A, Edwards A C, Foy R H. Phosphorus cycling in UK agriculture and implications for phosphorus loss from soil. *Soil Use and Management*, 2001, 17(3): 139-149.
- [24] Domburg P, Edwards A C, Sinclair A H, Chalmers N A. Assessing nitrogen and phosphorus efficiency at farm and catchment scale using nutrient budgets. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2000, 80(13): 1946-1952.
- [25] van Beek C L, Brouwer L, Oenema O. The use of farmgate balances and soil surface balances as estimator for nitrogen leaching to surface water. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2003, 67(3): 233-244.
- [26] Bechmann M, Eggstad H O, Vagstad N. Nitrogen balances and leaching in four agricultural catchments in southeastern Norway. *Environmental Pollution*, 1998, 102(1): 493-499.
- [27] Watson C A, Atkinson D. Using nitrogen budgets to indicate nitrogen use efficiency and losses from whole farm systems: a comparison of three methodological approaches. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1999, 53(3): 259-267.
- [28] Withers P J A, Lord E I. Agricultural nutrient inputs to rivers and groundwaters in the UK: policy, environmental management and research needs. *Science of the Total Environment*, 2002, 282/283: 9-24.
- [29] Öborn I, Edwards A C, Witter E, Oenema O, Ivarsson K, Withers P J A, Nilsson S I, Stinzing A R. Element balances as a tool for sustainable nutrient management: a critical appraisal of their merits and limitations within an agronomic and environmental context. *European Journal of Agronomy*, 2003, 20(1/2): 211-225.
- [30] Oenema O, Kros H, de Vries W. Approaches and uncertainties in nutrient budgets: implications for nutrient management and environmental policies. *European Journal of Agronomy*, 2003, 20(1/2): 3-16.
- [31] Brouwer F. Nitrogen balances at farm level as a tool to monitor effects of agri-environmental policy. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1998, 52(2/3): 303-308.
- [32] Oenema O, Boers P C M, van Eerd M M, Fraters B, van der Meer H G, Roest C W J, Schröder J J, Willems W J. Leaching of nitrate from agriculture to groundwater: the effect of policies and measures in the Netherlands. *Environmental Pollution*, 1998, 102(1): 471-478.
- [33] Diebel M W, Maxted J T, Nowak P J, Zanden M J V. Landscape planning for agricultural nonpoint source pollution reduction I: A geographical allocation framework. *Environmental management*, 2008, 42(5): 789-802.
- [34] Ou Y, Wang X Y. Identification of critical source areas for non-point source pollution in Miyun reservoir watershed near Beijing, China. *Water Science and Technology*, 2008, 58(11): 2235-2241.
- [35] Heckrath G, Bechmann M, Ekholm P, Ulén B, Djodjic F, Andersen H E. Review of indexing tools for identifying high risk areas of phosphorus loss in Nordic catchments. *Journal of Hydrology*, 2008, 349(1/2): 68-87.
- [36] Lemunyon J L, Gilbert R G. The concept and need for a phosphorus assessment tool. *Journal of Production Agriculture*, 1993, 6(4): 483-496.
- [37] Sharpley A N, Weld J L, Beegle D B, Kleinman P J A, Gburek W J, Moore P A Jr, Mullins G. Development of phosphorus indices for nutrient management planning strategies in the United States. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, 58(3): 137-152.
- [38] Heathwaite A L, Quinn P F, Hewett C J M. Modelling and managing critical source areas of diffuse pollution from agricultural land using flow connectivity simulation. *Journal of Hydrology*, 2005, 304(1/4): 446-461.
- [39] Doody D G, Archbold M, Foy R H, Flynn R. Approaches to the implementation of the Water Framework Directive: targeting mitigation measures at critical source areas of diffuse phosphorus in Irish catchments. *Journal of Environmental Management*, 2012, 93(1): 225-234.

- [40] Andersen H E, Kronvang B. Modifying and evaluating a P index for Denmark. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2006, 174(1/4): 341-353.
- [41] Heathwaite A L, Dils R M. Characterising phosphorus loss in surface and subsurface hydrological pathways. *Science of the Total Environment*, 2000, 251-252: 523-538.
- [42] Flynn N J, Paddison T, Whitehead P G. INCA modelling of the Lee system: strategies for the reduction of nitrogen loads. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2002, 6(3): 467-484.
- [43] Czymmek K J, Ketterings Q M, Geohring L. Phosphorus and agriculture VII: the new phosphorus index for New York State. *What's Cropping Up in Agronomy*, 2001, 11(4): 1-3.
- [44] Li N, Guo H C. Review of risk assessment of phosphorus loss potential from agricultural non-point source: phosphorus index. *Progress in Geography*, 2010, 29(11): 1360-1367.
- [45] Cecchi G, Munafo M, Baiocco F, Andreani P, Mancini L. Estimating river pollution from diffuse sources in the Viterbo province using the potential non-point pollution index. *Annali dell' Istituto superiore di sanità*, 2007, 43(3): 295-301.
- [46] Wu X F, Li T. Study on the assessment model about contaminant load distribution in basins——take Sheyuchuan small watershed as example. *China Environmental Science*, 2011, 31(4): 680-687.
- [47] Hewett C J M, Quinn P F, Heathwaite A L, Doyle A, Burke S, Whitehead P G, Lerner D N. A multi-scale framework for strategic management of diffuse pollution. *Environmental Modelling and Software*, 2009, 24(1): 74-85.
- [48] Brown L, Scholefield D, Jewkes E C, Lockyer D R, del Prado A. NGAUGE: a decision support system to optimise N fertilisation of British grassland for economic and environmental goals. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2005, 109(1/2): 20-39.
- [49] Del Prado A, Misselbrook T, Chadwick D, Hopkins A, Dewhurst R J, Davison P, Butler A, Schröder J, Scholefield D. SIMSDAIRY: A modelling framework to identify sustainable dairy farms in the UK. Framework description and test for organic systems and N fertiliser optimisation. *Science of the Total Environment*, 2011, 409(19): 3993-4009.
- [50] Johnes P J, Foy R, Butterfield D, Haygarth P M. Land use scenarios for England and Wales: evaluation of management options to support good ecological status in surface freshwaters. *Soil Use and Management*, 2007, 23(S1): 176-194.
- [51] Tian Y W, Huang Z L, Xiao W F. Dynamic change of non-point source pollution exported from Heigou watershed in Three Gorges Reservoir Area. *Environmental Science*, 2011, 32(2): 423-427.
- [52] Yu T, Meng W, Ongley E, Zheng B H, Deng Y X. Problems and recommendations for non-point source pollution identification in China. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(3): 401-407.
- [53] Heathwaite A L, Fraser A I, Johnes P J, Hutchins M, Lord E, Butterfield D. The phosphorus indicators tool: a simple model of diffuse P loss from agricultural land to water. *Soil Use and Management*, 2003, 19(1): 1-11.
- [54] Panagopoulos Y, Makropoulos C, Mimikou M. Decision support for diffuse pollution management. *Environmental Modelling and Software*, 2012, 30: 57-70.
- [55] Gitau M W, Gburek W J, Jarrett A R. A tool for estimating best management practice effectiveness for phosphorus pollution control. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 60(1): 1-10.
- [56] Gitau M W, Veith T L, Ghurek W J, Jarrett A R. Watershed level best management practice selection and placement in the Town Brook Watershed, New York. *Journal of the American Water Resources Association*, 2006, 42(6): 1565-1581.
- [57] Corsi I, Mariottini M, Sensini C, Lancini L, Focardi S. Fish as bioindicators of brackish ecosystem health: integrating biomarker responses and target pollutant concentrations. *Oceanologica Acta*, 2003, 26(1): 129-138.
- [58] Beven K. Changing ideas in hydrology-the case of physically-based models. *Journal of Hydrology*, 1989, 105(1/2): 157-172.
- [59] Jakeman A J, Hornberger G M. How much complexity is warranted in a rainfall-runoff model? *Water Resources Research*, 1993, 29(8): 2637-2649.
- [60] Chaubey I, Chiang L, Gitau W M, Mohamed S. Effectiveness of best management practices in improving water quality in a pasture-dominated watershed. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 65(6): 424-437.
- [61] Oenema O, van Liere L, Schoumans O. Effects of lowering nitrogen and phosphorus surpluses in agriculture on the quality of groundwater and surface water in the Netherlands. *Journal of Hydrology*, 2005, 304(1/4): 289-301.
- [62] Hong Q, Xu L, Sun Z L, Tian T, Liu R M, Shen Z Y. Small-scale watershed extended method for non-point source pollution estimation and case study in part of Three Gorges Reservoir Region. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2012, 9(4): 595-604.

参考文献:

- [1] 王晓燕. 非点源污染过程机理与控制管理——以北京密云水库流域为例. 北京: 科学出版社, 2011: 287-290.
- [3] 王晓燕, 张雅帆, 欧洋, 阎育梅. 最佳管理措施对非点源污染控制效果的预测——以北京密云县太师屯镇为例. *环境科学学报*, 2009, 29(11): 2440-2450.
- [22] 刘曦, 陈阜, 蔡万涛, 唐衡, 雷杰. 北京市通州区农田表观氮素平衡及空间特征分析. *中国农业大学学报*, 2009, 14(2): 52-58.
- [44] 李娜, 郭怀成. 农业非点源磷流失潜在风险评价——磷指数法研究进展. *地理科学进展*, 2010, 29(11): 1360-1367.
- [46] 武晓峰, 李婷. 流域内污染负荷分布的评价模型研究——以密云县蛇鱼川小流域为例. *中国环境科学*, 2011, 31(4): 680-687.
- [51] 田耀武, 黄志霖, 肖文发. 三峡库区黑沟小流域非点源污染物输出的动态变化. *环境科学*, 2011, 32(2): 423-427.
- [52] 于涛, 孟伟, Ongley E, 郑丙辉, 邓义祥. 我国非点源负荷研究中的问题探讨. *环境科学学报*, 2008, 28(3): 401-407.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33, No. 5 March, 2013 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- The effect of nitrogen deposition on forest soil organic matter and litter decomposition and the microbial mechanism WANG Jingyuan, ZHANG Xinyu, WEN Xuefa, et al (1337)
- Advances and the effects of industrial hemp for the cleanup of heavy metal pollution LIANG Shumin, XU Yanping, CHEN Yu, et al (1347)
- A review for evaluating the effectiveness of BMPs to mitigate non-point source pollution from agriculture MENG Fande, GENG Runzhe, OU Yang, et al (1357)
- Progresses in dendrochronology of shrubs LU Xiaoming, LIANG Eryuan (1367)

Autecology & Fundamentals

- The characteristics of nocturnal sap flow and stem water recharge pattern in growing season for a *Larix principis-rupprechtii* plantation WANG Yanbing, DE Yongjun, XIONG Wei, et al (1375)
- Effects of soil drought stress on photosynthetic characteristics and antioxidant enzyme activities in *Hippophae rhamnoides* Linn. seedlings PEI Bin, ZHANG Guangcan, ZHANG Shuyong, et al (1386)
- Diurnal activity time budget of Père David's deer in Hubei Shishou Milu National Nature Reserve, China YANG Daode, LI Zhuyun, LI Pengfei, et al (1397)
- Sublethal effects of three insecticides on the reproduction and host searching behaviors of *Sclerodermus sichuanensis* Xiao (Hymenoptera: Bethytidae) YANG Hua, YANG Wei, YANG Chunping, et al (1405)

Population, Community and Ecosystem

- Seasonal succession of zooplankton in Sansha Bay, Fujian XU Jiayi, XU Zhaoli (1413)
- Biomass production and litter decomposition of lakeshore plants in Napahai wetland, Northwestern Yunnan Plateau, China GUO Xuhu, XIAO Derong, TIAN Kun, et al (1425)
- The flora and species diversity of herbaceous seed plants in wetlands along the Xin'anjiang River from Anhui YANG Wenbin, LIU Kun, ZHOU Shoubiao (1433)
- Spatial-temporal variation of root-associated aerobic bacterial communities of *phragmites australis* and the linkage of water quality factors in constructed wetland XIONG Wei, GUO Xiaoyu, ZHAO Fei (1443)
- Temporal dynamics and influencing factors of leaf respiration for three temperate tree species WANG Zhaoguo, WANG Chuankuan (1456)
- Environmental controls on water use efficiency of a poplar plantation under different soil water conditions ZHOU Jie, ZHANG Zhiqiang, SUN Ge, et al (1465)
- An analysis of calcium components of *Artemisia ordosica* plant on sandy lands in different ecological regions XUE Pingping, GAO Yubao, HE Xingdong (1475)
- Effects of alpine meadow plant communities on soil nematode functional structure in Northern Tibet, China XUE Huiying, HU Feng, LUO Daqing (1482)
- Soil fauna diversity of abandoned land in a copper mine tailing area ZHU Yongheng, SHEN Fei, YU Jian, et al (1495)
- Effects of ciprofloxacin on microbial biomass carbon and carbon metabolism diversity of soil microbial communities MA Yi, PENG Jinju, WANG Yun, et al (1506)
- Estimation of ecological water demands based on ecological water table limitations in the lower reaches of the Liaohe River Plain, China SUN Caizhi, GAO Ying, ZHU Zhengru (1513)

Landscape, Regional and Global Ecology

- The ecological security patterns and construction land expansion simulation in Gaoming SU Yongxian, ZHANG Hong'ou, CHEN Xiuzhi, et al (1524)
- Root features of typical herb plants for hillslope protection and their effects on soil infiltration LI Jianxing, HE Binghui, CHEN Yun (1535)

The dynamic change of the thermal environment landscape patterns in Beijing, Shanghai and Guangzhou in the recent past decade	MENG Dan, WANG Mingyu, LI Xiaojuan, et al (1545)
Change trends and driving factors of base flow in Kuye River Catchment	LEI Yongnan, ZHANG Xiaoping, ZHANG Jianjun, et al (1559)
Photosynthetic characteristics, biomass allocation, C,N and P distribution of <i>Schima superba</i> seedlings in response to simulated nitrogen deposition	LI Mingyue, WANG Jian, WANG Zhenxing, et al (1569)
Effect of iron slag adding on methane production, oxidation and emission in paddy fields	WANG Weiqi, LI Pengfei, ZENG Congsheng, et al (1578)

Resource and Industrial Ecology

Antioxidative system and chlorophyll fluorescence of <i>Zizania latifolia</i> Turcz. plants are affected by <i>Ustilago esculenta</i> infection	YAN Ning, WANG Xiaoqing, WANG Zhidan, et al (1584)
Analysis of cold-regulated gene expression of the Fingered Citron(<i>Citrus medica</i> L. var. <i>sarcodactylis</i> Swingle)	CHEN Wenrong, YE Jiejun, LI Yongqiang, et al (1594)
Hosts preference of <i>Echinothrips americanus</i> Morgan for different vegetables ...	ZHU Liang, SHI Baocai, GONG Yajun, et al (1607)
Induction effects of jasmonic acid on tannin content and defense-related enzyme activities in conventional cotton plants	YANG Shiyong, WANG Mengmeng, XIE Jianchun (1615)
Effects of irrigation with paper mill effluent on growth and nutrient status of <i>Populus tomentosa</i> seedlings	WANG Ye, XI Benye, CUI Xiangdong, et al (1626)
Water use efficiency of Jiangsu Province based on the data envelopment analysis approach	ZHAO Chen, WANG Yuan, GU Xueming, et al (1636)

Research Notes

Characteristics of precipitation distribution in <i>Pinus tabulaeformis</i> plantations under different canopy coverage in Taiyue Mountain	ZHOU Bin, HAN Hairong, KANG Fengfeng, et al (1645)
Driving factor analysis on the vegetation changes derived from the Landsat TM images in Beijing	JIA Baoqun (1654)
Effects of <i>Mikania micrantha</i> wilt virus infection on photosynthesis and the activities of four enzymes in <i>Mikania micrantha</i> H. B. K.	WANG Ruilong, PAN Wanwen, YANG Jiaoyu, et al (1667)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索自然奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 33 卷 第 5 期 (2013 年 3 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 5 (March, 2013)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元