

杨 辰, 苏本营, 方广玲, 等. 干热河谷农业面源污染及其防治[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(10):1848–1856.

YANG Chen, SU Ben-ying, FANG Guang-ling, et al. Agricultural non-point source pollution and countermeasures of dry-hot valley: A review[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(10):1848–1856.

干热河谷农业面源污染及其防治

杨 辰^{1,2}, 苏本营^{1,2}, 方广玲^{1,2}, 香 宝^{1,2*}

(1.中国环境科学研究院, 北京 100012; 2.环境生态科学研究所, 北京 100012)

摘 要:我国的干热河谷光热资源充足,干湿季分明,蒸发量大,适合发展热作、反季节作物和立体农业,但干热河谷地区的农业面源污染问题也需要引起足够的关注,特别是防治干热河谷地区农业面源污染的技术和方法。从这个角度出发,以我国干热河谷地区农业面源污染为讨论对象,从种植业和养殖业两方面介绍干热河谷地区农业面源污染现状,分析了干热河谷地区农业面源污染形成的一般性原因和特殊的地方性原因,并针对其污染原因,讨论了各种传统的和新兴的农业面源污染防治技术研究进展、应用于干热河谷地区的可行性和前景,以期防治干热河谷地区的农业面源污染。

关键词:干热河谷;农业面源污染;地方性

中图分类号:X71 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2016)10-1848-09 **doi:**10.11654/jaes.2016-0323

Agricultural non-point source pollution and countermeasures of dry-hot valley: A review

YANG Chen^{1,2}, SU Ben-ying^{1,2}, FANG Guang-ling^{1,2}, XIANG Bao^{1,2*}

(1.Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2.Institute of Environmental Ecology, Beijing 100012, China)

Abstract: Dry-hot valley regions, mainly located in Southwest China, are featured of a special climate with rich light and heat resources and trenchant dry wet season. These climatic advantages offer a special agricultural development, such as cultivation of tropical plants, out-of-season crops as well as stereoscopic agriculture. However, such intense agriculture development is and will result in serious non-point source pollution in dry-hot valley regions, which should be highly paid attention to due to their ecological vulnerability. Meanwhile, counter-measures are urgently needed to be raised to solve the non-point source pollution in dry-hot valley regions. In this review, we firstly showed a brief introduction of the agricultural development in the dry-hot valley regions. Then, we discussed the current situation of agricultural non-point source pollution in the dry-hot valley area, and correspondingly analyzed the general and special reasons for the agricultural non-point source pollution in these areas from the two respects of cropping and livestock farming together with local social-culture aspects. Finally, we reviewed both the traditional and newly-developed technologies and methods of controlling agricultural non-point source pollution with analyses of their feasibility and prospect in dry-hot valley. This review will be helpful to prevent and control agricultural non-point source pollution in dry-hot valley regions.

Keywords: dry-hot valley; agricultural non-point source pollution; endemic

随着我国目前对生态环境保护特别是水环境质量改善的高度重视,以及点源污染治理技术和方案的

日臻成熟完善,面源污染特别是和农业生产直接相关的农业面源污染正在成为污染防治中的一个重要方面^[1-2]。在我国,干热河谷地区是南方部分山区河谷地带的小范围特殊自然地理区域,相对于南方其他主要农业区域,其特殊的优势体现在突出的光热水平、漫长的生长期,沿江河的取水优势和立体气候优势等。农业生产以泛热带作物、反季作物和立体种植为代表的种植业为主,兼有分散性养殖业。目前,针对我国干

收稿日期:2016-03-12

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划课题(2014BAD14B02);冻融条件下农田非点源污染过程和水质目标管理技术研究(2014ZX07201-009-01)

作者简介:杨 辰(1989—),男,硕士,主要从事农业生态环境保护研究。E-mail:392872782@qq.com

* 通信作者:香 宝 E-mail:xiangbao@craes.org.cn

热河谷地区农业面源污染及其防治的系统性研究较少,而开展该方向的研究,对当地环境和江河水环境质量改善具有重要意义和价值。

干热河谷地区的农业面源污染除了由导致农业面源污染的普遍性原因引起之外,由于干热河谷地区的自然、人文条件均较我国其他主要农业区域有较大差异,需要特别重视分析干热河谷地区农业面源污染形成和发展的地方性原因,并针对这些原因,从种植业和养殖业两个方面切入,分析已经投入应用的其他具备可行性的农业面源污染防治成熟技术以及新兴技术,并探讨这些技术在干热河谷地区推广应用的前景。

1 我国干热河谷农业发展现状

1.1 干热河谷的农业条件

我国的干热河谷是位于南方部分山区地带的一类小范围特殊区域,主要分布于金沙江、怒江、澜沧江和雅砻江的中、下游,元江的中游等河谷区,涉及云南省和四川省西南部 10 余个地、州、市,另外在贵州省和广西省也有少量分布,其总长度为 4105 km,总面积 11 230 km²。本区一般为中山峡谷,地势陡峭,河谷深切,具有山高谷深、平坝交错的分布特点,土壤类型以燥红土为主^[3]。由于地形隔绝、大气环流、焚风(干热风)效应等因素^[4],这一区域农业气候较我国南方其他同纬度主要农业区域特殊。如位于滇中高原以北金沙江流域的元谋坝区,年均温在 22℃左右,最冷月均温 14~16℃,极端最低气温-2.1~-0.1℃,≥10℃的活动积温可达 7900~8500℃,无霜期高达 350 d 以上^[5-8],远远优于纬度近似的湖南郴州^[9]。元谋坝区日平均日照时数 7.3 h^[8],也大幅超过郴州(4.3 h)^[10]和同属西南山区的贵州省平均水平(3.0~4.4 h)^[11]。因此,突出的光热水平、漫长的生长期,加上干热河谷沿江河的取水优势,山地海拔高度不同带来的立体气候优势等,构成该地区发展泛热带作物、反季作物和立体种植的主要有利条件。但干热河谷也存在降水偏少且时空分布、年际变化极为不均衡的特点,伴随着良好光热条件下巨大的蒸发量,使得这一地区频繁遭受水旱灾害^[6,8,12];此外,土壤退化^[6,12]、水土流失严重^[8]、山区平地面积狭窄^[12-13]以及山区固有的交通联络不便等,成为该地区农业生产过程中的制约条件。

1.2 种植业发展现状简介

干热河谷有利的农业条件使其成为开发较早的山地农业区,形成以农作物种植为主的农业格局^[4],且具有鲜明的地方特色,主要是反季作物、泛热带作物,

并以立体种植为主。云南元谋县利用自身气候上的优势,经过长期发展已形成以反季蔬菜、青枣和早熟葡萄为三大支柱的作物种植结构^[14]。四川宁南县以种植桑树、甘蔗和烟叶为支柱,生产优质蚕桑、甘蔗和云烟。四川攀枝花市仁和区以南亚热带果品生产和加工为主线,建立了芒果、石榴、葡萄、剑麻等商品基地。此外,四川会理等拥有干热河谷的县(市、区)也形成了一些较好的种植业发展模式^[15]。

1.3 养殖业发展现状简介

和种植业相比,干热河谷受制于各种自然和人为条件,养殖业长期以来并不发达,大多是作为种植业、林业的附属出现,规模化养殖业甚少。例如,四川宁南县利用银合欢叶为原料加工饲料发展当地畜牧业^[15];云南元谋干热河谷有少量自给自足的“果+菜(草)+畜(禽、牧)”模式进行复合种养的农户^[16]。由于干热河谷的农村较多使用畜力车作为主要的运输工具,作为畜力车牵引牲畜的马、驴和骡也有一定的保有量^[9]。

2 干热河谷的农业面源污染现状及其形成原因

目前,受到干热河谷跨行政区域、地处偏远等因素的制约,以干热河谷农业面源污染现状为主线的系统性调查研究尚未开始,干热河谷面源污染现状一般通过涉及省市的调查结果直接或间接地反映一部分,基本能够证实干热河谷地区 and 我国其他农业区域一样,存在农业面源污染问题。造成干热河谷农业面源污染的除了普遍原因之外,由于干热河谷自身环境和农业发展的特殊性,还存在着一些特殊的地方性因素,现分析如下。

2.1 普遍原因

2.1.1 种植业原因

(1)化肥和农药的过度施用。化肥和农药的过度施用是农业面源污染的主要来源之一^[17]。以国际公认的 225 kg·hm⁻² 的单位播种面积年化肥施用量上限来衡量^[18],我国干热河谷地区的化肥施用量普遍偏高 50%以上,部分地区超出 200%以上(表 1)。对云南省大理州的农业面源污染现状调查表明,大理州坝区与河

表 1 干热河谷地区部分市县化肥施用情况

Table 1 Application of chemical fertilizer in some areas of dry-hot valley in China

市县	化肥施用量/×10 ⁴ t	单位化肥用量/kg·hm ⁻²	超过国际上限/%
临沧	19.89 ^[19]	395.4	75.72
宾川	3.44 ^[20]	799.7	255.39
东川	0.92 ^[21]	369.8	64.30

谷区化肥农药施用量占全州施用总量的85%以上,部分地区氮、磷肥施用量竟高达 $2640\sim 5295\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。同样,干热河谷及其附近区域也存在农药过度施用问题,如元谋县部分地区年农药的施用量超过 $15\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,超过发达国家以及同县其他村镇 $6\sim 7.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 普遍施用水平的2倍以上^[23]。导致过度施用化肥的首要原因是化肥较通常的农家肥施用效果更加快速显著^[24],可以认为过度施用农药是基于相似的原因;加上现代农业技术的深入人心,更加剧了农民对于化肥和农药的高度依赖性。以大理州坝区为例,该区域典型的化肥利用率仅有15%~35%,特别是和总氮、总磷等农业面源污染指标直接相关的氮磷肥利用率只有25%左右,大部分化肥残留在土壤中或随水流失^[18]。已有研究表明,在农村地下水中已经检测出硝酸盐类和多种农药成分^[25]。

化肥和农药的施用方法不当也是造成干热河谷地区化肥农药用量过度、利用率偏低的一大原因。例如雨季在水土流失严重的地段大量施用速效肥料^[26],形成恶性循环。昭通市是云南省化肥施用量和流失量均位于前列的市州^[27],该市下辖的巧家县河谷地带就存在低水平施用化肥和农药特别是凭想象施用化肥的行为^[28]。

(2)过度灌溉。干热河谷地区节水灌溉设施的普及程度很低,大部分地方的农业特别是田地灌溉依旧依赖漫灌,漫灌对水的有效利用率很低。如元谋热区葡萄园漫灌用水量每公顷可达 $13\,500\sim 18\,000\text{ m}^3$,而采用覆膜滴灌后,每公顷用水量降至 $5\,250\text{ m}^3$ 左右^[29],漫灌的用水量较节水灌溉方式高出2倍以上。结合较高的复种指数,致使该地区一方面农业用水量远超国内平均水平,和这一带时空性缺水的整体形势形成尖锐矛盾;另一方面漫灌极易形成过度灌溉,浪费掉的大量灌溉用水使地表径流加大,造成人为的土壤侵蚀和土壤淋溶,加重这一地区的农业面源污染程度。

2.1.2 养殖业原因

长期以来干热河谷地区的养殖业不发达,规模化养殖业比例较低(表2),以散养为主。即使列入统计

表2 干热河谷地区部分地州规模化养殖比例

Table 2 The proportion of large scale livestock in some areas of dry-hot valley in China

地州	生猪/%	肉牛/%	肉羊/%	家禽/%
昭通	24.85	15.89	24.54	28.32 ^[27]
楚雄	28.52	20.77	25.34	22.27 ^[31]
红河	27.55	16.37	18.54	25.05 ^[32]
凉山	30.32	25.00	27.42	19.96 ^[33]

的规模化养殖业,如果严格按照国家相关标准,绝大多数也达不到规模化养殖的规模下限^[30]。因此,干热河谷地区未回收利用的畜禽粪尿直排是该地区农业面源污染养殖业方面的主要原因。从数据来看,由于这一带的养殖业规模不大,加上通过沼气池等措施回收了很大一部分,面源污染物排放总量不大,如元谋县丙间水库径流区 COD_Cr 排放量为 $159.95\text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$,TN排放量为 $27.00\text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$,TP排放量为 $10.11\text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$ ^[30]。但随着干热河谷地区为了农民增收、改善农业结构而相继引入畜禽养殖业或者扩大现有畜禽养殖业规模的发展趋势,这一问题还会进一步凸显。

2.2 特殊的地方性原因

2.2.1 地方自然环境原因

(1)土壤瘠薄,保持水肥的能力很差。干热河谷地区土壤多由当地岩石短期发育而来,并受干热河谷昼夜温差大、高温强光照以及降水强度大等气候条件的强烈影响,具有土层薄、砂石含量高、表层肥沃、土壤流失严重的特点,自身保持水肥的能力很差,且因人口相对集中,农业生产技术落后等人为活动原因更加剧了这一趋势^[4]。干热河谷地区的化肥利用率较全国平均水平明显偏低^[34-35],为了获得更高产量,农民会施用更大量的化肥。例如,元谋干热河谷为了达到和几十年前相近的粮食产量,需要施用近3倍量的化肥^[36]。这种超量施肥会造成更多的未利用化肥流失,客观上加重了该地区的面源污染程度。

(2)雨季降水集中,降水强度大,养分流失严重。干热河谷地区雨季通常为6—10月,持续时间较短,但降水量往往超过地区全年总降水量的80%^[37],相当集中^[38]。由于降水强度大,且干热河谷地区土壤侵蚀模数非常高^[39],短时强降水往往伴随强烈的土壤侵蚀,而土壤侵蚀是危害最严重的农业面源污染形式^[17]。例如,元谋县老城乡1998年一次降水110 mm,造成流入金沙江的侵蚀泥沙达550万t之多^[36]。研究证明,在短时强降水的条件下,地表径流自身携带的溶解态氮和侵蚀泥沙富集的颗粒态氮的流失是农田氮素养分流失的两大途径,且与径流量大小呈正相关^[26];而溶解态氮的主要成分是硝酸盐类,被认为是导致水体富营养化的主要原因之一^[40-41];与之相类似,磷在农业径流中也是以溶解态和颗粒态两种形式转运^[41],流失方式和氮近似。随着降水流失的氮、磷等土壤养分可很大程度上增加农业面源污染的强度。

2.2.2 地方社会环境原因

(1)人口密度较大,居住相对集中。干热河谷优越

的光热条件和高复种指数,使得这一地区人口相对密集,平均人口密度已经超过 $100 \text{ 人} \cdot \text{km}^{-2}$ ^[4],且除了彝族等少数民族^[42],其余人口高度集中于河流边水热条件较好的低热坝区,以农业人口为主。大量的农业人口聚集势必会产生显著的农业面源污染,且污染区离江河近,容易对流经河流产生较大冲击。

(2)经济总体落后,城乡差异很大。干热河谷地带大多偏远闭塞,加上干热气候,历史上经济发展相对缓慢。随着近几十年的开发建设,虽然各县市发展有了较大提速,也出现了像攀枝花这样的大城市,但由于历史欠账和现实中种种制约,该地区总体经济特别是农村经济依然落后,如巧家县、金阳县等干热河谷县区都是国家级贫困县。在地形阻隔、行政区划等多种因素作用下,攀枝花等经济条件较好的城镇和贫困落后的农村间差异很大,且二者同时并存,城镇的资金技术等资源长期无法辐射到农村,加上农村经济落后,导致当地农民的科学文化素养偏低,大多数人环保意识不强,普遍使用传统落后的种植业和畜牧业生产方式^[9]。落后的种植业生产方式导致水土流失和土壤侵蚀加剧,直接和间接地对水体造成面源污染;对燃料的需求等造成了秸秆等农业废弃有机物的直接焚烧;畜禽粪尿的回收率低,直接排放问题亦不可忽视。

2.2.3 特殊的农业生产环境和生产方式

(1)高复种指数。干热河谷地区的气候条件决定了这一区域一年三熟制、两年五熟制或两年七熟制较为普遍^[37],复种指数很高。这也导致了相应的化肥、农药投入量,秸秆等农业生产残留物产生量和灌溉用水量等居高不下,相应问题一年四季均可存在,使得干热河谷地区的农业面源污染强度明显高于我国中东部的主要农业区域。

(2)自身条件限制外来作物引种。随着人口增加,干热河谷地区为了养活更多的人口和产生更大的经济效益,往往盲目引种高产外来作物,而干热河谷自身的环境条件较为敏感,引种不恰当的作物品种往往会造成一系列不良后果^[13],不利于该地区的水土保持,间接增加了该地区农业面源污染水平。

(3)对农膜的依赖性较其他农业地区更大。干热河谷地区气候大陆性强,白天升温迅速,夜间辐射降温显著,昼夜温差大,特别是冬季,为了克服夜间低温和低地温,往往采用覆膜技术。农膜对于干热河谷地区保持土壤水分、减少蒸发也具有十分重要的作用^[43],并且这一地区生长季节长,这也增加了使用农膜的需要。因此,这一地区对农膜的依赖性较其他农

业地区更大,即使是几乎没有设施农业的偏远乡镇,农膜也是不可缺少的^[18]。

(4)气温高,劳动能力下降明显。干热河谷地区气温较高,特别是春夏之交,不少地方的极端最高气温都超过 40°C ,如元江(42.3°C)和元谋(42.0°C)^[44-45]。在温度较高的条件下,人的劳动能力会显著下降。而很多能够显著降低农业面源污染的技术,如垄沟种植模式^[46],所需要的劳动强度较大,干热河谷地带农民采用的积极性低。这也是导致干热河谷地区农业面源污染的地方性原因之一。因此,在干热河谷地区推广农业面源污染防治技术,劳动强度是不可忽视的重要因素。

(5)民族习惯和地方习惯受到现代农业方式的冲击。干热河谷地区往往是多民族混居的地区,之前长期以原始朴素的方式适应当地的自然环境,形成了许多特有的民族习惯和地方习惯。这些习惯一方面有其原始落后的一面,但另一方面由于是当地人长期适应自然环境的朴素经验,也有其合理和有益的一面,只是记录和表现方式不易被时代所接受,加上往往与刀耕火种等原始农业生产方式和宗教崇拜等一并出现^[47],其在干热河谷地区引入当代的生活和农业方式之后往往被当做原始落后的东西,以至一并消亡或者式微,客观上打破了原始生产下的平衡状态,而现代化的农业面源污染防治体系未及时跟进,由此加剧了干热河谷地区的农业面源污染水平。

3 干热河谷农业面源污染防治技术研究进展和应用分析

3.1 现有成熟技术

3.1.1 种植业优化施肥技术

(1)降低化肥使用量,推广化肥替代品。针对干热河谷地区化肥使用量较大、利用率较低的特点,在该地区防治农业面源污染时,应首先降低化肥的使用量,最直接的途径是进行测土配方施肥,干热河谷沿线的宾川^[20]等县(市、区)已有成功的经验可供借鉴,其次是推广化肥替代品,如有机肥和冬绿肥^[48]。在推广化肥替代品时,尽可能坚持本地自产原则,一方面就地取材可以显著降低成本,另一方面也可有效利用本地秸秆等农业废弃物,降低其对环境的污染。

(2)调整施肥方式,提高化肥利用率。干热河谷地区化肥的利用率较全国平均水平偏低,因此,提高化肥的利用率也是减少化肥施用量的有效途径。提高化肥利用率的关键在于恰当的调整施肥方式。例如,在预报的暴雨或雷阵雨来临之前,应暂时性停止施用速

效肥料,防止肥料大量损失^[26]。此外,还要把调整施肥方式和防治水土流失的措施结合起来。

3.1.2 农药减量化技术

(1)控制农药的使用。一方面严格控制使用农药的种类,严禁使用位列当年最新《国家禁用和限用农药名录》上的禁用农药,严格控制《名录》上的限用农药以及其他未列入的高毒农药的使用量,尽量选用土壤吸附力强、半衰期短易于降解的农药品种;另一方面需要改进农药的施用和方法,特别是尽量减少直接向土壤表面施用农药^[49]。

(2)谨慎应用生物制剂。可以在经过审慎的评估之后,谨慎选择引进生物制剂,如微生物农药^[50]。

(3)采用物理诱杀方法。物理诱杀方法主要用于杀灭农业害虫,具有副作用小、投入低、无毒无害的优点。目前比较成熟的物理诱杀技术有黄板法和太阳能杀虫灯法,将这两种方法结合运用,可确保被保护农田昼夜均具备对害虫的物理防御能力,适合在干热河谷地区推广应用。但废弃的黄板和太阳能灯的工作结构属于废弃物,均需注意及时回收和妥善处理,否则会造成新的污染。

3.1.3 废弃物处理与利用技术

(1)发展秸秆等农田废弃物堆肥技术。针对干热河谷地区土壤贫瘠、保肥能力差、水土流失严重等特点,应发展秸秆等农田废弃物堆肥技术。干热河谷自身热量条件充足,未利用土地数量多,并且地形闭塞、人口相对密集且文化素质偏低,大部分地区不适合开展大型机械作业和复杂工程技术。在我国中东部平原受到种种因素制约的高温堆沤还田技术^[51],在干热河谷地区能够充分利用丰富的热能资源和充足的未利用土地,且方法传统简便,具有较好的推广前景。

(2)重视农膜的制造和使用技术。我国目前多以聚乙烯为材质制成农膜特别是地膜使用^[52],而聚乙烯等传统人工合成材料的降解速度缓慢,容易残余造成农膜污染。为改变这一现状,可以研究开发新型易降解薄膜材料,但在干热河谷地区由于成本等因素,短期内并不适合大面积推广。较为现实可行的是对废旧农膜进行回收分类,具有重复利用价值的可以继续使用,否则可以统一回收进行集中转运和集中处置。

(3)发展太阳能技术。利用区域光照资源丰富和不可农用地多的特点,大力发展太阳能技术^[6],减少传统方式对农业废弃物直接燃烧作为燃料的依赖。

3.1.4 其他农艺措施

(1)充分利用干热河谷适合复种轮作的先天优

势。采用轮作种植模式可减少养分随地表径流流失^[53]。干热河谷地区复种指数高,非常有利于开展复种轮作。结合反季作物等时间差优势,可产生较高的经济效益,同时复种轮作可在一定程度上改善土壤结构,增加土壤肥力,减少水土流失,减少某些病虫害的发生,从而降低该区域化肥和农药的施用量。

(2)根据地方环境条件筛选推广适宜的作物品种。干热河谷地区特有的优质农产品种质资源贫乏,因此仍需要引入适宜的种质资源作为补充和替代,而依托当地或者附近现有的科技力量^[54],细致分析地方环境条件,可以最大限度减少引种的盲目性。获得适宜的作物品种,既能够产生经济效益,又保护了当地水土和肥力,降低农业面源污染水平。

(3)改良耕作方式。国外有研究表明,采用免耕法可大幅减少土壤侵蚀,并相应减少氮、磷等养分的流失量^[55]。该方法符合干热河谷地区土壤侵蚀强度极大、且对劳动强度十分敏感的现状。但免耕法有一定的适用范围,其在干热河谷地区能否推广有待于进一步的研究。

(4)注意吸收当地少数民族在生态保持和恢复方面的成功经验和技能。干热河谷地区的少数民族在长期适应自然环境的过程中,积累了丰富的生态保持经验和技能。吸收和利用这些技能,可以有效恢复和保护当地的生态环境^[13]。结合现代农业面源污染防控技术,有效防治干热河谷地区农业面源污染。

3.1.5 养殖业污染控制技术

防治干热河谷地区畜禽养殖业所带来的农业面源污染,关键是要解决好畜禽粪尿的直排问题。干热河谷地区的环境条件和农业发展状况,适合应用我国南方地区正在推广的“畜禽-沼-果/菜”种养结合模式^[54]。该模式以沼气建设为核心,利用沼气技术可处理畜禽粪尿和秸秆等农田有机废弃物,减少其带来的农业面源污染;沼液可以替代传统的农药浸种,沼液和沼渣还是优质的有机肥,可以减少化肥的施用量,从而降低因过量施用化肥和农药所带来的农业面源污染^[54,56]。同时,利用沼气的纽带作用和干清粪等其他成熟的畜禽养殖技术,结合该地区丰富的光热资源,利于实现地区内的种养结合发展。

针对该地区的特殊气候特点和不断扩大的规模化畜禽养殖规模,可采取清污分流、楼式高床圈舍、粪肥还田、利用高温堆肥法制取有机肥等技术对规模化养殖场或养殖小区产生的畜禽粪便进行综合利用,配套建设沼气发电等相关设施。另外,对规模化养殖可

能产生的染疫个体或畜禽尸体,要按照有关法律法规建设无害化处理设施^[57-58]。

3.2 具有潜力的其他防治技术

(1)应用胡同式复合农林系统。近年来针对干热河谷的自然条件,为了防治干热河谷地区土壤退化,发展该地区农业,设计出胡同式复合农林系统并在部分地区取得了初步成效^[59]。该技术对农业面源污染的防控作用主要体现在减少化肥、农药、除草剂的使用量。该技术能够直接或间接产生经济收益,因此便于接受,具有广阔的前景。

(2)应用河岸缓冲带技术。利用河岸缓冲带拦截入河径流中的污染物,减少径流中污染物的水平,有潜力作为农业面源污染防控的手段之一^[60]。一些学者对河岸缓冲带拦截污染物方面开展了一系列研究工作^[61-63],并提出了设计规划步骤^[63],但也有一些学者对河岸缓冲带拦截污染物的效能持保留意见^[64]。在我国的干热河谷地区应用这一技术,需要从当地的实际情况出发,综合考虑所选植物种类,地形、水文、土壤等条件,占地面积等因素,以及技术实现的难度特别是劳动强度和成本问题,选择适当的河岸缓冲带技术进行防控。

(3)利用3S技术和数学建模进行区域性的防控指导。在面源污染防治方面,针对干热河谷地区地形复杂、山高谷深,可以利用3S技术进行区域性的农业面源污染定性、定量分析,并根据分析的结果得到相对较好的方案,指导当地进行防控。随着现代3S技术软硬件的迅速发展,预计使用成本会越来越低。国外已经有一些小规模试点性应用。例如,利用GIS技术对长期积累的农业面源污染相关因素数据进行处理分析,可揭示各因素和水质之间的关系^[26],预测面源污染趋势以采取针对性的措施或规避面源污染风险^[65],进一步可用于防控方案的筛选^[66]。有学者将这一技术在河谷地带进行试点应用,得到面源污染最佳管理实践方案^[67],可以为我国干热河谷地区所借鉴。与其作用近似的数学建模既可以作为独立的方法使用^[68],也可以和3S技术特别是和模型关系较为密切的GIS技术协同使用^[69-71]。

4 展望

干热河谷作为我国农业生产的特殊地区,其自然和人文环境条件决定了这一地区农业面源污染的产生除了遵循普遍性规律之外,还具有相当浓厚的地方性特点。结合这种地方性特点,对干热河谷地区农业

面源污染的发生发展和机理进行系统性研究,并针对研究结果,从种植业和养殖业两个方面切入,研发和引进适合的防治技术,制定恰当的应对策略,对当地农业和生态环境改善和江河水质环境质量改善两大方面,无疑具有重要意义和价值。

随着以后数年内西南地区特别是金沙江梯级水利工程的不断建成,干热河谷地区还会面临大量被淹没农地的原有面源污染物快速入水问题和水库库区沿岸消落带污染物问题,从本质上来说,这两类问题也属于土壤侵蚀范畴,故需要在未来一段时间内予以足够的重视。另外,利用兴建水利工程产生的大量沿岸消落带作为新的河岸缓冲带,也可以开展有关研究。

参考文献:

- [1] 庄源益,陶志宁,戴树桂,等.降雨面源污染及其模型研究近况[J].环境科学进展,1994,2(5):20-34.
ZHUANG Yuan-yi, TAO Zhi-ning, DAI Shu-gui, et al. Recent development in study of nonpoint source pollution from rainfall[J]. *Advance in Environmental Science*, 1994, 2(5):20-34.
- [2] 李芬春.凤庆县农业面源污染现状及防治对策[J].云南农业科技,2012(增刊1):155-157.
LI Fen-chun. Current status and countermeasures of agricultural non-point pollution in Fengqing County[J]. *Yunnan Agricultural Science and Technology*, 2012(Suppl 1):155-157.
- [3] 陈利顶,王军,傅伯杰.我国西南干热河谷脆弱生态区可持续发展战略[J].中国软科学,2001,1(6):95-99.
CHEN Li-ding, WANG Jun, FU Bo-jie. Strategy on sustainable development of eco-fragile area of xerothermic valley in Southwest China[J]. *China Soft Science Magazine*, 2001, 1(6):95-99.
- [4] 沙毓沧,纪中华,李建增,等.西南地区干热河谷生态环境问题[J].西南农业学报,2006,19(增刊1):312-318.
SHA Yu-cang, JI Zhong-hua, LI Jian-zeng, et al. Ecological problems of dry hot valley in China Southwest[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2006, 19(Suppl 1):312-318.
- [5] 周小平.元谋县冬番茄栽培技术[J].云南农业科技,1981(4):32-34.
ZHOU Xiao-ping. Winter tomato cultivation techniques in Yuanmou County[J]. *Yunnan Agricultural Science and Technology*, 1981(4):32-34.
- [6] 杨万勤,王开运,宋光煜,等.金沙江干热河谷典型区生态安全问题探析[J].中国生态农业学报,2002,10(3):116-118.
YANG Wan-qin, WANG Kai-yun, SONG Guang-yu, et al. Investigation on ecological safety in the dry-hot valley of Jinsha River[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2002, 10(3):116-118.
- [7] 王建文,王克勤,任占远,等.元谋干热河谷坡面径流蓄积过程中的面源污染物变化[J].西南林业大学学报,2012,32(1):25-29.
WANG Jian-wen, WANG Ke-qin, REN Zhan-yuan, et al. Change of non-point pollutant during the accumulation process of slope runoff in the dry-hot valley in Yuanmou County[J]. *Journal of Southwest Forestry*

- University, 2012, 32(1):25-29.
- [8] 冉国富. 改善元谋坝区自然生态环境:封山护草领先[J]. 生态经济, 1989(2):47-49.
- RAN Guo-fu. Protecting grass to improve the ecological environment of Yuanmou Basin[J]. *Ecological Economy*, 1989(2):47-49.
- [9] 刘长青. 山茶花无性繁殖技术[J]. 湖南林业科技, 2001, 28(3):94.
- LIU Chang-qing. The asexual propagation techniques of camellia[J]. *Hunan Forestry Science & Technology*, 2001, 28(3):94.
- [10] 匡传富. 湖南郴州植烟区气候特征及适宜性评价[J]. 现代农业科技, 2009(17):284-286.
- KUANG Chuan-fu. Climatic characteristics and suitability evaluation of tobacco planting areas in Chenzhou, Hunan Province[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2009(17):284-286.
- [11] 郑小波, 罗宇翔, 周成霞, 等. 近45年来贵州省日照时数的变化特征[J]. 气象研究与应用, 2007, 28(增刊2):2-4.
- ZHENG Xiao-bo, LUO Yu-xiang, ZHOU Cheng-xia, et al. Climatic change of sunshine duration over Guizhou Province during the last 45 years[J]. *Journal of Meteorological Research and Application*, 2007, 28(Suppl 2):2-4.
- [12] 何毓蓉, 张丹, 张映翠, 等. 金沙江干热河谷区云南土壤退化过程研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 5(4):1-6.
- HE Yu-rong, ZHANG Dan, ZHANG Ying-cui, et al. Approach to soil degradation process in dry and hot valley region of Jinsha River, Yunnan Province[J]. *Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation*, 1999, 5(4):1-6.
- [13] 杨庭硕, 伍孝成. 民族文化与干热河谷灾变的关联性[J]. 云南社会科学, 2011(2):39-44.
- YANG Ting-shuo, WU Xiao-cheng. Association of national culture and dry hot valley disasters[J]. *Social Sciences in Yunnan*, 2011(2):39-44.
- [14] 李贵华, 张武, 陆晓英, 等. 干热河谷元谋区红地球葡萄主要病虫害及其防治[J]. 中国南方果树, 2014, 43(1):91-93.
- LI Gui-hua, ZHANG Wu, LU Xiao-ying, et al. Prevention and control of diseases and pests of red globe grape grown in Yuanmou dry-hot valley region[J]. *South China Fruits*, 2014, 43(1):91-93.
- [15] 郭正模. 加强对长江生态治理关键地区的投入和政策支持:四川金沙江干热河谷生态环境治理考察报告[J]. 国土经济, 2001(2):32-34.
- GUO Zheng-mo. Strengthen investment and policy support to the key areas of the Yangtze River ecological governance: Reports on the ecological environment governance of the Jinsha River dry-hot valley in Sichuan Province[J]. *Territorial Economy*, 2001(2):32-34.
- [16] 杨艳鲜, 冯光恒, 潘志贤, 等. 干热河谷旱坡地生态农业可持续发展探索与实践:以金沙江元谋干热河谷为例[J]. 亚热带农业研究, 2009, 5(3):212-216.
- YANG Yan-xian, FENG Guang-heng, PAN Zhi-xian, et al. Exploration and practice on sustainable development of eco-agricultural models on dry slope land in dry-hot valley: Take Yuanmou dry-hot valley for instance in Jinsha River[J]. *Subtropical Agriculture Research*, 2009, 5(3):212-216.
- [17] 郭鸿鹏, 朱静雅, 杨印生. 农业非点源污染防治技术的研究现状及进展[J]. 农业工程学报, 2008, 24(4):290-295.
- GUO Hong-peng, ZHU Jing-ya, YANG Yin-sheng. Research status and development of technologies for controlling the agricultural non-point source pollution[J]. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(4):290-295.
- [18] 栾江, 仇焕广, 井月, 等. 我国化肥施用量持续增长的原因分解及趋势预测[J]. 自然资源学报, 2013, 28(11):1869-1878.
- LUAN Jiang, QIU Huan-guang, JING Yue, et al. Decomposition of factors contributed to the increase of China's chemical fertilizer use and projections for future fertilizer use in China[J]. *Journal of Natural Resource*, 2013, 28(11):1869-1878.
- [19] 辉志仁. 临沧市年鉴2014[M]. 昆明:云南人民出版社, 2014.
- HUI Zhi-ren. The yearbook of Lincang[M]. Kunming, Yunnan people's press, 2014.
- [20] 李超位. 宾川年鉴2014[M]. 德宏:德宏民族出版社, 2014.
- LI Chao-wei. The yearbook of Binchuan[M]. Dehong: Dehong National Press, 2014.
- [21] 刘荣. 东川年鉴2014[M]. 德宏:德宏民族出版社, 2014.
- LIU Rong. Dongchuan yearbook[M]. Dehong: Dehong National Press, 2014.
- [22] 张建华, 杨理芳, 李秀培, 等. 大理州推广农村户用沼气技术治理农业面源污染[J]. 云南农业科技, 2006(2):5-7.
- ZHANG Jian-hua, YANG Li-fang, LI Xiu-pei, et al. Dissemination of rural domestic biogas technology in agricultural non-point source pollution control in Dali Bai Autonomous Prefecture[J]. *Yunnan Agricultural Science and Technology*, 2006(2):5-7.
- [23] 陈晓雯. 云南省元谋县农药使用状况及其健康问题研究[D]. 昆明:昆明医科大学, 2012.
- CHEN Xiao-wen. A study on the pesticide use and related health problems in Yuanmou County of Yunnan Province[D]. Kunming: Kunming Medical University, 2012.
- [24] Berka C, Schreier H, Hall K. Linking water quality with agricultural intensification in a rural watershed[J]. *Water Air & Soil Pollution*, 2001, 127(1-4):389-401.
- [25] Smith C N, Jr P W, Jr P J, et al. A field study to compare performance of stainless steel research monitoring wells with existing on-farm drinking water wells in measuring pesticide and nitrate concentrations[J]. *Chemosphere*, 1999, 38(4):875-889.
- [26] 黄满湘, 章申, 唐以剑, 等. 模拟降雨条件下农田径流中氮的流失过程[J]. 土壤与环境, 2001, 10(1):6-10.
- HUANG Man-xiang, ZHANG Shen, TANG Yi-jian, et al. Nitrogen losses from farm runoff under simulated rainfall conditions[J]. *Soil and Environmental Sciences*, 2001, 10(1):6-10.
- [27] 聂顺荣. 昭通年鉴2015[M]. 德宏:德宏民族出版社, 2015.
- NIE Shun-rong. Zhaotong yearbook[M]. Dehong: Dehong National Press, 2015.
- [28] 林吉慧. 充分用好云南省巧家县蒙姑镇的每寸土地[J]. 北京农业, 2014(3):60.
- LIN Ji-hui. Make full use of rural land in Menggu, Qiaojia County, Yunnan Province[J]. *Beijing Agriculture*, 2014(3):60.
- [29] 李贵华, 张武, 张永辉, 等. 干热河谷区葡萄不同灌溉模式需水量

- 调查[J]. 中国热带农业, 2013(3):43-44.
- LI Gui-hua, ZHANG Wu, ZHANG Yong-hui, et al. Investigation on grape water requirement of different irrigation modes in dry-hot valley area[J]. *China Tropical Agriculture*, 2013(3):43-44.
- [30] 赵映雄. 元谋县集中式饮用水源地环境现状及环境保护对策[J]. 环境科学导刊, 2010, 29(3):63-66.
- ZHAO Ying-xiong. Present environmental situation and environmental protection measures of drinking water source areas in Yuanmou[J]. *Environmental Science Survey*, 2010, 29(3):63-66.
- [31] 彭加武, 李富才. 楚雄市畜牧业发展情况[J]. 云南畜牧兽医, 2014(1):21-23.
- PENG Jia-wu, LI Fu-cai. Development of animal husbandry in Chuxiong[J]. *Yunnan Journal of Animal Science and Veterinary Medicine*, 2014(1):21-23.
- [32] 谭 萍. 红河州年鉴 2014[M]. 昆明:云南人民出版社, 2014.
- TAN Ping. Yearbook of Honghe prefecture[M]. Kunming: Yunnan People's Press, 2014.
- [33] 尹克发. 凉山年鉴 2014[M]. 北京:方志出版社, 2015.
- YIN Ke-fa. Liangshan yearbook[M]. Beijing: Chronicle Press, 2015.
- [34] 李庆逵. 中国农业持续发展中的肥料问题[M]. 南昌:江西科学技术出版社, 1997.
- LI Qing-kui. Fertilizer problems in the sustainable development of agriculture in China[M]. Nanchang: Jiangxi Science and Technology Press, 1997.
- [35] 方敏瑜, 张建锋, 陈益泰, 等. 发展坡地农用林业治理农业面源污染[J]. 湖北林业科技, 2008(2):34-38.
- FANG Min-yu, ZHANG Jian-feng, CHEN Yi-tai, et al. Developing agroforestry in slope land to control non-point source pollution in agriculture[J]. *Hubei Forestry Science and Technology*, 2008(2):34-38.
- [36] 于丽娟, 杜长江. 干热河谷地区农业可持续发展研究[J]. 农村经济, 2008(7):67-68.
- YU Li-juan, DU Chang-jiang. Study on the sustainable development of agriculture in dry hot valley region[J]. *Rural Economy*, 2008(7):67-68.
- [37] 丘宝剑. 我国西部季风区的气候带划分[J]. 热带地理, 1982(4):1-7.
- QIU Bao-jian. Division of climatic zones in the monsoon region of western China[J]. *Tropical Geography*, 1982(4):1-7.
- [38] 李 昆, 刘方炎, 张春华. 干热河谷气候本质特征与植被恢复[J]. 世界林业研究, 2009, 22:24-27.
- LI Kun, LIU Fang-yan, ZHANG Chun-hua. Essential characteristic of climate and plant recovery in dry-hot valley[J]. *World Forestry Research*, 2009, 22:24-27.
- [39] 杜天理. 西南地区干热河谷开发利用方向[J]. 资源科学, 1994(1):41-45.
- DU Tian-li. The orientation of exploitation and utilization of dry/hot river valley in Southwest China[J]. *Resources Science*, 1994(1):41-45.
- [40] Arhonditsis G, Tsirtsis G, Angelidis M O, et al. Quantification of the effects of nonpoint nutrient sources to coastal marine eutrophication: Applications to a semi-enclosed gulf in the Mediterranean Sea[J]. *Ecological Modelling*, 2000, 129(2):209-227.
- [41] Sharpley A N, Withers P J A. The environmentally-sound management of agricultural phosphorus[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1994, 39(2):133-146.
- [42] 张信宝, 王丽槐, 王 青, 等. 金沙江下游彝族山区的“长治”工程与社会主义新农村建设[C]// 2008 年中国水土保持学会小流域综合治理与新农村建设研讨会, 2008.
- ZHANG Xin-bao, WANG Li-huai, WANG Qing, et al. The "Yangtze River management Project" and the construction of new socialist countryside in the Yi mountains in the lower reaches of Jinsha River[C]// 2008 CSSWC small watershed management and construction of new socialist countryside seminar. 2008.
- [43] 张 德, 沙毓沧, 段曰汤, 等. 对元谋干热河谷农业水资源合理利用的建议[J]. 国土与自然资源研究, 2010(5):91-92.
- ZHANG De, SHA Yu-cang, DUAN Yue-tang, et al. Suggestions on reasonable utilization of agricultural water resource for the dry-hot valley of Yuanmou[J]. *Territory & Natural Resources Study*, 2010(5):91-92.
- [44] 封军华, 张 悦, 曹江飞. 元江县热坝区火龙果丰产栽培管理技术[J]. 云南农业科技, 2014(5):34-35.
- FENG Jun-hua, ZHANG Yue, CAO Jiang-fei. Cultivation management and technical measures of high yield pitaya varieties in hot flatland of Yuanjiang County[J]. *Yunnan Agricultural Science and Technology*, 2014(5):34-35.
- [45] 唐顺芳. 元谋坝的气候资源与农业发展决策[J]. 热带地理, 1987, 7(4):366-371.
- TANG Shun-fang. The climate resource and development decision of agriculture in Yuanmou valley[J]. *Tropical Geography*, 1987, 7(4):366-371.
- [46] 程 杰, 高亚军, 强 秦. 渭北旱塬小麦不同栽培模式对土壤硝态氮残留的影响[J]. 水土保持学报, 2008, 22(4):104-110.
- CHENG Jie, GAO Ya-jun, QIANG Qin. Effects of different wheat cultivation methods on residual nitrate nitrogen in soil in Weibei Dryland[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22(4):104-110.
- [47] 郑 军. 巴楚文化圈民族习惯与生态环境保护[J]. 贵州社会科学, 2009(9):105-109.
- ZHENG Jun. National habits and ecological environment protection of Bachu Cultural Circle[J]. *Guizhou Social Sciences*, 2009(9):105-109.
- [48] 孙和平, 顾国洪, 吴露平. 控制农业面源污染的对策与展望[J]. 现代农业, 2008(9):70-72.
- SUN He-ping, GU Guo-hong, WU Lu-ping. Countermeasures and prospect of controlling agricultural non-point source pollution[J]. *Modern Agriculture*, 2008(9):70-72.
- [49] 林超文, 陈一兵, 黄晶晶, 等. 成都平原蔬菜生产中灌溉水对农药渗漏的影响研究[J]. 生态环境, 2005, 14(5):710-714.
- LIN Chao-wen, CHEN Yi-bing, HUANG Jing-jing, et al. Effect of irrigation on pesticides leaching in vegetable farming in Chengdu plain using PEARL model[J]. *Ecology and Environment*, 2005, 14(5):710-714.
- [50] 刘萍萍, 闫艳春. 微生物农药研究进展[J]. 山东农业科学, 2005(2):78-80.
- LIU Ping-ping, YAN Yan-chun. Progress of research on microbial pes-

- ticides[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2005(2):78-80.
- [51] 刘雪, 邵红侠. 秸秆还田的方法和推广措施探讨[J]. 河南农业, 2004(5):42.
- LIU Xue, SHAO Hong-xia. Discussion on the method of straw return-ing to field and its popularization[J]. *Henan Agriculture*, 2004(5):42.
- [52] 罗雅莹, 杨志新. 氮流失形成的面源污染及防控措施研究[J]. 现代农业科技, 2012(9):293-296.
- LUO Ya-ying, YANG Zhi-xin. Non-point source pollution formed by nitrogen losses and control measures[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2012(9):293-296.
- [53] 沙毓沧, 朱宏业, 张映翠, 等. 金沙江干热河谷农业自然资源现状和可持续发展潜力[J]. 云南热作科技, 1998, 21(4):41-45.
- SHA Yu-cang, ZHU Hong-ye, ZHANG Ying-cui, et al. Present status on agro-natural resource of Jinshajiang xerothermic river valley and continuable developmental potential[J]. *Journal of Yunnan Tropical Crops Science & Technology*, 1998, 21(4):41-45.
- [54] 刘德江. 生态农业技术[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2014.
- LIU De-jiang. Eco-agriculture technology[M]. Beijing: China Agricul-tural University Press, 2014.
- [55] Phillips D L, 高鹏. 农业耕作措施对非点源污染的影响[J]. 水土保持科技情报, 1994(3):6-7.
- Phillips D L, GAO Peng. Effect of agricultural tillage measures on non-point source pollution[J]. *Scientific and Technical Information of Soil and Water Conservation*, 1994(3):6-7.
- [56] 周朴玲. 红塔区沼气建设与农业面源污染防治[J]. 云南农业科技, 2012(增刊1):114-115.
- ZHOU Pu-ling. The construction of biogas and the prevention and con-trol of agricultural non-point source pollution in Hongta district[J]. *Yunnan Agricultural Science and Technology*, 2012(Suppl 1):114-115.
- [57] 中华人民共和国国务院. 畜禽规模养殖污染防治条例[M]. 北京: 中国法制出版社, 2013.
- The State Council of the People's Republic of China. Livestock and poultry scale cultivation pollution prevention and control regulations [M]. Beijing: China Legal Publishing House, 2013.
- [58] 何光熊, 史亮涛, 潘志贤, 等. 元谋干热河谷肉山羊圈舍优化设计与实践[J]. 草业科学, 2015, 32(7):1170-1178.
- HE Guang-xiong, SHI Liang-tao, PAN Zhi-xian, et al. Optimized de-sign and application of meat goat sheds in arid-hot valley of Yuanmou [J]. *Pratacultural Science*, 2015, 32(7):1170-1178.
- [59] 何毓蓉, 黄成敏, 杨忠, 等. 云南省元谋干热河谷的土壤退化及旱地农业研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1997, 3(1):56-60.
- HE Yu-rong, HUANG Cheng-min, YANG Zhong, et al. Soil degrada-tion and dryland farming in Yuanmou dry and hot valley, Yunnan Province[J]. *Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation*, 1997, 3(1):56-60.
- [60] Ülo Mander, Kull A, Kuusemets V, et al. Nutrient runoff dynamics in a rural catchment; Influence of land-use changes, climatic fluctuations and ecotechnological measures[J]. *Ecological Engineering*, 2000, 14(4):405-417.
- [61] Daniels R B, Gilliam J W. Sediment and chemical load reduction by grass and riparian filters[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1996, 60(1):246-251.
- [62] Walter Brusch, Bertel Nilsson. Nitrate transformation and water move-ment in a wetland area[J]. *Hydrobiologia*, 1993, 251(1-3):103-111.
- [63] Anbumozhi V, Radhakrishnan J, Yamaji E. Impact of riparian buffer zones on water quality and associated management considerations[J]. *Ecological Engineering*, 2005, 24(5):517-523.
- [64] Leeds-Harrison P B, Quinton J N, Walker M J, et al. Grassed buffer strips for the control of nitrate leaching to surface waters in headwater catchments[J]. *Ecological Engineering*, 1999, 12(3/4):299-313.
- [65] Xiao H G, Wei J. Relating landscape characteristics to non-point source pollution in mine waste-located watersheds using geospatial techniques[J]. *Journal of Environmental Management*, 2007, 82(1):111-119.
- [66] Reed T, Carpenter S R. Comparisons of P-yield, riparian buffer strips, and land cover in six agricultural watersheds[J]. *Ecosystems*, 2002, 5(6):568-577.
- [67] Morari F, Lugato E, Borin M. An integrated non-point source model-GIS system for selecting criteria of best management practices in the Po Valley, North Italy[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2004, 102(3):247-262.
- [68] Walker D J. Modelling residence time in stormwater ponds[J]. *Ecologi-cal Engineering*, 1998, 10(3):247-262.
- [69] Basnyat P, Teeter L D, Lockaby B G, et al. The use of remote sensing and GIS in watershed level analyses of non-point source pollution problems[J]. *Forest Ecology & Management*, 2000, 128(1):65-73.
- [70] Lenzi M A, Luzio M D. Surface runoff, soil erosion and water quality modelling in the Alpone watershed using AGNPS integrated with a geo-graphic information system[J]. *European Journal of Agronomy*, 1997, 6(1):1-14.
- [71] Shen Z, Liao Q, Hong Q, et al. An overview of research on agricultural non-point source pollution modelling in China[J]. *Separation & Pu-rification Technology*, 2012, 84(2):104-111.