基于输出系数模型的南四湖流域非点源污染输出风险评估

荆延德[1,2], 张华美[1,2], 孙笑笑[1,2]

(1.山东省高校南四湖湿地生态与环境保护重点实验室, 山东 济宁 273165; 2.曲阜师范大学 地理与旅游学院, 山东 日照 276826)

摘　要:[目的] 探究非点源污染物 N、P 输出风险在不同子流域、坡度等级和县市区的分布特征,为南四湖流域不同风险区制定管理方案和控制对策提供科学依据。[方法] 以数字高程模型(digital elevation model, DEM)为基础数据,运用 ArcGIS 软件,提取南四湖流域的 DEM,制作坡度等级图,再运用水文分析功能,提取水系图、河流图、并划定子流域,结合 2013 年南四湖流域土地利用图,通过运用输出风险模型分析不同的土地利用类型和坡度下氮(N),磷(P)污染的空间变化。[结果] 氮素的平均风险概率达到 51.67%,磷素的平均风险概率达到 9.14%,南四湖流域非点源污染输出风险湖东小于湖西;随坡度增大,高风险区面积减小,低风险区面积增加;就不同县市区而言,济宁市中区的 N 风险较小之外,其余县市区 N 风险均较大,P 风险较小。[结论] N 是流域最主要的非点源污染物,非点源污染输出风险大小与土地覆盖和坡度有密切关系。

关键词:南四湖流域; 输出系数; 非点源污染; 风险评估

文献标识码:A　　**文章编号**:1000-288X(2017)03-0270-05　　**中图分类号**:X820.4

文献参数:荆延德, 张华美, 孙笑笑. 基于输出系数模型的南四湖流域非点源污染输出风险评估[J]. 水土保持通报,2017,37(3):270-274. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.20170401.001; Jing Yande, Zhang Huamei, Sun Xiaoxiao. Risk assessment of non-point source pollution in Nansihu Lake Basin using output coefficient model[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(3): 270-274. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20170401.001

Risk Assessment of Non-point Source Pollution in Nansihu Lake Basin Using Output Coefficient Model

JING Yande[1,2], ZHANG Huamei[1,2], SUN Xiaoxiao[1,2]

(1. *Key Laboratory of Nansihu Lake Wetland Ecological and Environmental Protection in Universities of Shandong, Jining, Shandong* 273165, *China*; 2. *College of Geography and Tourism, Qufu Normal University, Rizhao, Shandong* 276826, *China*)

Abstract: [Objective] The objective of this study is to explore the distribution characteristics of the output risk of non-point source pollutants nitrogen(N) and phosphorus(P) under different conditions of sub basin, slope grade and geographical demarcation(counties), and to provide scientific basics for administer plan and control countermeasure of different risk areas of Nansihu Lake Basin. [Methods] Based on digital elevation model(DEM) data, the Nansihu Lake Basin DEM was extracted and slope grade was extracted using ArcGIS software. Then applying hydrologic analysis function, we extracted the drainage and river figures and delimited the drainage basin. Combined with the land use map of Nansihu Lake Basin in 2013, the space changes of N, P pollution under different land cover and slope were analyzed using the output risk model. [Results] The average risk probability of N reached 51.67%. The average risk probability of P reached 9.14%. The output risk of non-point source pollution in the east of lake was less than that in the west. With the increase of slope, the high risk area reduced, but the low risk area increased. In terms of geographical demarcation,

收稿日期:2016-10-09　　**修回日期**:2016-10-20

资助项目:教育部人文社会科学研究面上项目"基于输出系数模型的南四湖流域非点源污染负荷估算及其对土地利用变化的响应研究"(15YJAZH027)

第一作者:荆延德(1970—),男(汉族),山东省淄博市人,博士,教授,硕士生导师,主要从事环境修复与资源再生方面的研究。E-mail:jingyande@163.com。

通讯作者:张华美(1989—),女(汉族),河南省项城市人,硕士研究生,研究方向为环境保护与修复。E-mail:zhanghuamei12@163.com。

Jining City was determined as less risk area of N, other counties had higher risk. The risk of P was less for all counties. [Conclusion] Nitrogen is the main basin non-point source pollutants. The output risk value of non-point source pollution has close relationship with land cover and slope.

Keywords: Nansihu Lake Basin; output coefficient; non-point source pollution; risk assessment

随着南四湖流域工业化、城市化进程加快,大量工业废水、生活污水、农业回水等未经处理注入河流和湖泊中,使得湖泊污染严重[1]。其中农业引起的非点源污染是目前水体污染最重大的问题之一[2]。与点源污染相比,非点源污染的发生具有随机性、广泛性、模糊性、滞后性等特点[3],这些特点决定了非点源污染难以预测,难以完全真实计算[4-6]。输出系数模型避开了非点源污染发生的复杂过程,不考虑中间过程和内在机制,操作简单,所需参数少,易获取资料[7],又有一定的核算精度,被广泛应用于大尺度流域范围上的非点源污染研究[8]。

输出系数模型在中国不同区域非点源污染研究上得到广泛关注和实践应用,已有关于三峡库区大宁河流域[9]、拉萨河流域[10]、呼兰河流域[8]等流域非点源污染输出风险分析的研究报道,研究重点大多集中在输出系数的确定、污染输出风险的计算、空间变化特征、控制对策制定等方面。但是以上研究大多针对河流流域的非点源污染输出风险评价研究,对以湖为中心的流域非点源污染输出风险研究甚少。据调查,针对山东省南四湖流域的非点源污染方面的研究还比较少,运用输出系数模型并结合 RS 和 GIS 技术对南四湖流域进行输出风险评估更是未见报道。本研究拟以南四湖流域为研究对象,基于输出系数法,主要考虑耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用土地 6 种土地利用类型非点源污染,估算南四湖各子流域非点源 N,P 输出风险概率,分析非点源污染输出风险随坡度和行政区的变化特征,研究结果将为南四湖流域社会经济发展与生态环境保护相协调提供决策依据和理论参考。

1　研究区概况

南四湖是微山湖、昭阳湖、独山湖、南阳湖的总称,其中微山湖面积最大,故又称微山湖,因位于山东省西南部的济宁以南而得名。南四湖为淮河流域第 2 大淡水湖,是鲁南、苏北地区的重要水源地,也是国家南水北调东线工程重要的输水通道和调蓄湖泊。南四湖流域位于北纬 34°41′—35°98′,东经 114°82′—117°83′,入湖河流 53 条,总流域面积 3.17×10^4 km^2,地处暖温带、半湿润地区,属暖温带大陆性冬夏季风气候[1],流域内多年平均降水量 700 mm 左右,年平均气温 14.2 ℃。流域内耕地面积占 84%,有较大比重,随着流域内工农业的迅速发展,人为氮、磷输入量随之增加,使得南四湖水质状况受到不同程度的影响,非点源污染是导致南四湖水质恶化和水体富营养化的主要因素。

2　研究方法和数据处理

2.1　研究方法

2.1.1　*输出系数模型*　20 世纪 70 年代初期,北美地区首先提出了输出系数模型,主要用来估算土地利用和湖泊富营养之间的关系[11],假设所有土地类型的输出系数都一样,导致结果和真实情况有很大误差,因而限制了模型的应用[12]。Johnes 等[13-14]不断对模型进行改进,使模型得到了进一步完善和广泛应用。输出系数模型公式的一般表达为:

$$L_j=\sum_{i=1}^{m}E_{ij}A_i+P$$

式中:j——污染物类别,本研究中主要为 N,P 两种污染物;i——流域内土地利用类型,本研究中主要考虑耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用土地;E_{ij}——污染物 j 在域内第 i 种土地利用类型上的输出系数。公式中 A_i 表示的含义不同,L_j 表示的意义也随之变化。当 A_i 表示流域内第 i 种土地利用类型面积时,L_j 表示的是污染物 j 在第 i 种土地利用上的污染负荷量(kg/a);当 A_i 表示流域内第 i 种土地利用类型的面积百分比时,L_j 表示的是流域内污染物 j 带权重的平均输出系数〔kg/(km^2 · a)〕,此用法就是输出风险模型,用于计算非点源污染输出风险概率。P——降水中携带的污染物的负荷量(kg/a),由于本研究区范围较大,且地表土地利用覆盖变化小,以 N 为主的营养物质在雨水中含量较少,降雨发生后研究区各处降水量强度差别不大,综上所述,不考虑降水对研究区非点源污染带来的风险。

由于林地相对于其他土地利用类型而言受到人为影响的作用较小,对水土流失又有滞留效应,一般认为林地是氮,磷污染的汇集区,自然状况下不会产生非点源污染输出风险,以林地的最大输出系数作为评价阈值,超过阈值的百分比即为风险概率。

2.1.2　*输出系数的确定*　运用输出风险模型的关键在于确定输出系数,本研究采用查阅文献法,得到耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用土地的输出系数。中国对此研究[15]集中在长江上游、松花江、黑河、太湖流域等热点地区,但是针对山东省内各流域

的研究甚少，因此在确定输出系数时，要考虑到与研究区自然状况相近的输出系数。参考孟晓云等[16]在云蒙湖流域的研究成果和全国范围输出系数的平均值，进一步确定南四湖流域不同土地利用类型的输出系数（表 1）。

表 1 南四湖流域不同土地利用类型全氮和全磷输出系数

污染物	污染物输出系数/(kg·hm^{-2}·a^{-1})					
	耕地	草地	林地	水域	建设用地	未利用土地
全氮	25.95	16.56	11.50	15.00	11.00	14.90
全磷	0.70	0.21	0.16	0.36	0.24	0.20

2.2 数据来源与处理

本研究所需数据有南四湖流域的 DEM 数据、2013 年 Landsat TM 影像和行政区划图（如表 2）。主要运用的数据处理软件为 ENVI 5.1 和 ArcGIS 10.1 软件。运用 ENVI 5.1 软件对遥感图像进行校正、镶嵌、裁剪及监督分类等，从而提取土地利用数据，结合全国土地资源分类系统和南四湖流域土地利用现状，根据自己的研究需要将土地利用类型重新划分为耕地（83.9%）、草地（0.2%）、林地（5.9%）、水域（5.2%）、建设用地（4.7%）与未利用土地（0.1%）。运用 ArcGIS 软件对下载的 DEM 数据进行拼接、裁剪处理得到研究范围内的 DEM 数据，并依据南四湖流域实际地形特征、土地利用精度和 DEM 数据精度，利用 ArcGIS 水文分析功能，将研究区 DEM 数据经过洼地填充、流向计算、汇流累积量计算及河网提取，根据自己的研究目的划分出 183 个子流域。

表 2 数据来源及说明

数据类型	说 明	来 源
土地利用数据	源数据类型是 Landsat 8 OLI-TIRS，分辨率为 30 m×30 m，反映了研究区土地利用状况	地理空间数据云、遥感图像解译
DEM 数据	分辨率为 90 m×90 m，用于生成研究区的轮廓图、水系图、坡度图和河流图	地理空间数据云
行政区划图	反映了研究区 30 个县（市、区）的空间分布和边界	

3 结果与分析

3.1 非点源污染输出风险空间分布特征

本研究结合南四湖流域土地利用类型图和子流域划分结果，计算出耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用土地 6 种土地利用类型在每个子流域的面积百分比，代入公式求出每个子流域的输出风险值，得出 2013 年南四湖流域总氮，总磷输出风险空间分布状况，结果见图 1。

由图 1 可知，南四湖流域总氮，总磷输出风险在空间分布上有较大差异。总氮平均输出风险概率达到 0.52，总磷平均输出风险概率仅 0.09，氮是流域最主要的非点源污染物。

流域内氮风险概率超过 0.50 的区域占总流域的 77.38%，大部分地区是中等风险区，磷风险概率为 0 的地区占流域面积的 10.95%，研究区内所有子流域的磷输出风险概率均小于 0.2，对南四湖流域非点源污染贡献较小。

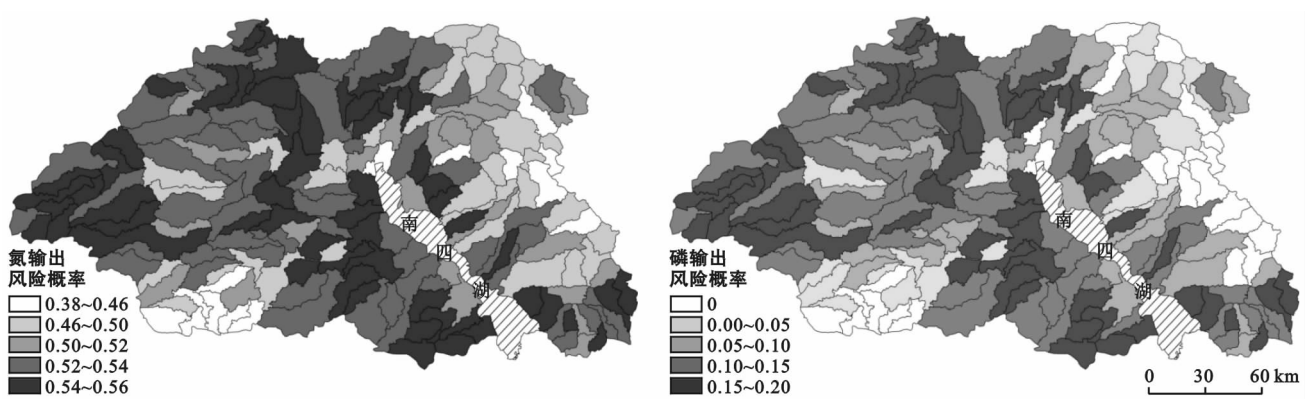


图 1 南四湖流域非点源污染输出风险空间分布

从图 1 中还可以看到，南四湖流域非点源氮污染输出风险湖东小于湖西，一方面，氮在环境中多以溶解态形式存在，且据调查，南四湖湖东入湖径流总量（2.75×10^9 m^3）大于湖西径流（2.15×10^8 m^3），即使大量污染物从东面入湖，也不会大幅度增加湖东面污染输出风险；另一方面，湖东面大部分流域是市区，耕

地占总流域面积小于建设用地,市区氮,磷污染的来源主要是生产生活排放,城市污水排放进入环境前经过处理,使得污染物含量降低。

由于南四湖流域研究区氮和磷输出风险范围有较大差别,目前没有明确统一的等级划分标准,根据图 1 中氮、磷风险划分间隔将风险划分 5 个等级,等级越高,风险值越大。各风险等级累计统计分析结果见图 2。结合图 1 和图 2 可以看出,氮风险主要集中在 0.52～0.56,占到总研究区面积的 65%;磷风险主要集中在 0.10～0.20,占总研究区面积的 62%。氮风险远高于磷风险,氮风险高于 0.50 的面积占到 77%,磷风险没有超过 0.50。总体来说,南四湖流域非点源氮污染较严重。

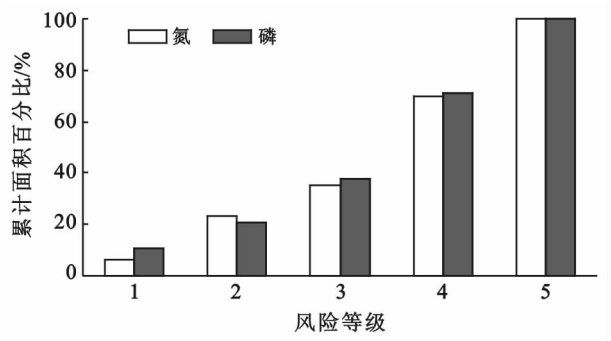


图 2　南四湖流域非点源污染输出风险累计面积比

3.2　基于坡度等级的流域非点源污染输出风险特征

运用 ArcGIS 的空间分析工具,从研究区 DEM 中提取坡度数据,并进行坡度分级,再将坡度分级数据和子流域图结合得出每个子流域的平均坡度,根据自己研究需要将研究区划分为 4 个坡度等级分别为平地[0°～3°)、缓平地[3°～5°)、缓地[5°～8°)、斜坡[8°～15°),分析南四湖流域非点源污染输出风险随坡度的变化特征,结果如表 3,坡度对于氮,磷风险的空间分布有较大影响。随着坡度增大,氮输出风险在等级 1,2,3 的面积逐渐增大,风险等级 4,5 面积逐渐减小;磷输出风险各等级面积随坡度的变化与氮有类似规律。且由于在研究区范围内地形主要以平原为主,土地利用类型以耕地最多,外界氮,磷输入较多。

表 3　南四湖流域非点源污染输出风险在不同坡级上的分布

主要污染物	坡度等级	风险等级值				
		1 级	2 级	3 级	4 级	5 级
氮	平地	0.04	0.13	0.11	0.39	0.33
	缓平地	0.11	0.48	0.22	0.07	0.12
	缓地	0.31	0.42	0.27	0.00	0.00
	斜坡	0.31	0.69	0.00	0.00	0.00
磷	平地	0.06	0.09	0.17	0.36	0.32
	缓平地	0.43	0.18	0.13	0.19	0.07
	缓地	0.48	0.26	0.26	0.00	0.00
	斜坡	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00

3.3　基于行政区划的流域非点源污染输出风险特征

运用 ArcGIS 软件,结合研究区的行政区划图、土地利用图,求出每个县(区)各土地利用类型面积百分比,代入输出系数模型公式,求得每个县(区)的输出风险,分析结果如图 3 所示。由图 3 可以看出,在不同县(区)内氮,磷输出风险有较大差别。每个县区内氮输出风险均大于磷输出风险。在研究区范围内的 30 各县区中,济宁市中区污染输出风险概率最小,氮风险概率不足 1%,无磷污染风险;除邹城区、枣庄市中区、山亭区氮风险概率小于 0.5 之外,余下 26 个县区的氮风险概率均 0.5～0.6,面积占到整个研究区的 90%;枣庄市中区、山亭区是无磷风险区,其余县区磷风险概率在 0.2 以内。但风险值的跨度与张立坤等[8]研究的呼兰河流域各县市区风险分布跨度有所不同,由于南四湖流域土地利用类型在各县市区之间差异较小,使得输出风险概率相对集中在一定范围内。

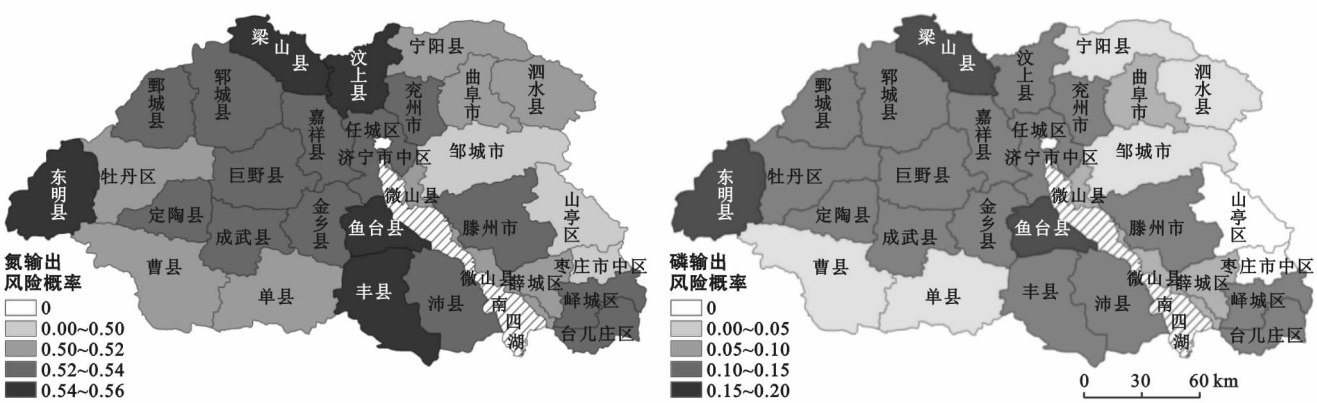


图 3　南四湖流域非点源污染输出风险在不同县区的分布

在本研究中研究的县市区数量比国内其他类似研究包含的县市区多，即减少了偶然误差并增加了地区之间对比度，又能从更广的视角体现流域内氮，磷污染的空间现状。综合来看，南四湖流域氮污染范围比较广，大部分县市区已即将超过中等污染程度，不仅对南四湖的水质有破坏作用，还对以南四湖流域为主要水资源的生产生活造成严重影响。

3.4 南四湖流域非点源污染分区管理与控制对策

为了对不同污染区域提出有效的管理措施，将整个南四湖流域划分为3个不同等级的风险区：轻微风险区(0.00～0.20)，低风险区(0.20～0.40)，中风险区(0.40～0.60)。从以上研究了解到，磷输出风险值主要集中在0.00～0.20，整个研究区都属于磷轻微风险区；氮输出风险值主要集中0.20～0.60，其中低风险区占研究区面积的2%，中风险区占98%，属于中风险程度的区域面积较大。由于氮元素是南四湖流域最主要的非点源污染物，因此对氮污染的治理工作最为紧迫。以氮的输出风险值为依据，划分管理区，结果见图4。

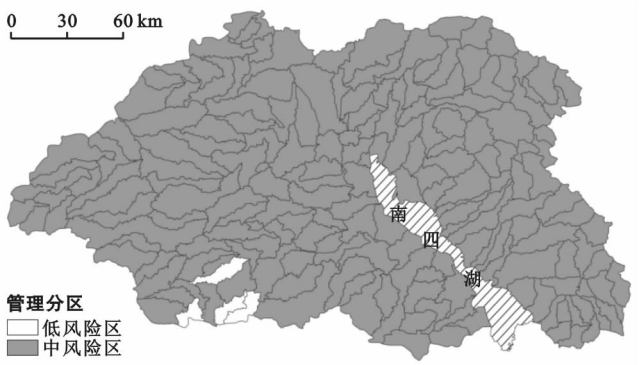


图4 南四湖流域氮污染治理管理分区

研究区有2%的面积在低风险区，主要分布在研究区西南的边缘地区。土地利用类型以耕地和林地为主，且比例相近，耕地会增加污染风险，由于离湖区较远，对湖水影响不大。除了对该区实施保护策略外，增加对氮污染源控制、减小污染范围有着重要作用。中风险区在研究区分布范围大，土地利用类型以耕地和城镇为主，污染来源较多，农药、化肥过度使用及生活污水排放都会造成非点源污染。南四湖流域主要以小麦和玉米为粮食作物，在成熟过程中对农药化肥需求量大，仅靠实施保护措施已达不到控制污染的目的，应限制农药使用计量、提高农药效果、控制化肥使用量，才能减少非点源污染排放。在实际控制管理中，需要将有限的治理资源投入到对水体危害可能性最大而范围相对较小的区域，从而降低治理难度并提高治理成效[17]。

4 讨论与结论

(1) 河流流量和土地利用类型对非点源污染有明显影响。流量越大，非点源污染输出风险越低，非点源污染越轻。耕地和草地所占比重越大的地区，非点源污染输出风险越高，污染越严重。从而使得南四湖流域非点源污染湖东小于湖西，这与李爽等[18]学者的观点并不冲突。本研究氮输出风险值相对集中在0.38～0.56，不如其他学者研究的河流流域氮风险值分散，原因是研究区范围较大，地区之间差距不明显，使得流域内部未出现极端风险区。

(2) 坡度对南四湖流域非点源污染有显著影响。随着坡度增大，高风险区面积减小，低风险区面积增大。研究区内坡度在0°～8°为最容易产生非点源污染的地区，研究结论与方广玲等[10]研究的拉萨河流域低风险等级主要分布在15°以下自然用地的结论有所不同，主要是由于不同研究区其自然环境和土地利用状况不同造成的。

(3) 南四湖流域非点源氮污染比磷污染严重，氮是最主要的非点源污染物，这与张立坤等[8]的研究结果一致。以氮的输出风险值为依据，将南四湖流域划分为不同的等级风险区，并针对不同风险区制定了相应的控制对策。轻微风险区以保护为主，控制输入到环境中氮，磷的量；低风险区主要污染物是氮，在研究区占有面积较小，因此可以通过种植具有固氮作用的植物，减小氮污染范围；中风险区面积较广，控制污染排放源达不到治理效果，改变土地利用方式、增加自然绿地面积能有效缓解污染状态。

[参 考 文 献]

[1] 沈吉，张祖陆，杨丽原，等. 南四湖：环境与资源研究[M]. 北京：地震出版社，2008.

[2] 许其功，刘鸿亮，沈珍瑶，等. 三峡库区典型小流域氮磷流失特征[J]. 环境科学学报，2007，27(2)：326-331.

[3] Weng Qihao. Modeling urban growth effects on surface runoff with the intergration of remote sensing and GIS[J]. Environmental Management，2001，28(6)：737-748.

[4] 丁晓雯，刘瑞民，沈真瑶. 基于水文水质资料的非点源输出系数模型参数确定方法及其应用[J]. 北京师范大学学报：自然科学版，2006，42(5)：534-538.

[5] 杨林章，王德建，夏立忠. 太湖地区农业面源污染特征及控制途径[J]. 中国水利，2004(20)：29-30.

[6] 蔡明，李怀恩，庄咏涛，等. 改进的输出系数法在流域非点源污染负荷估算中的应用[J]. 水利学报，2004(7)：1-8.

[7] Ding Xiaowen，Sheng Zhenyao，Hong Qian，et al. Development and test of the export coefficient model in the upper reach of the Yangtze River[J]. Journal of Hydrology，2010，383(3/4)：233.

(下转第278页)

综合分析整个研究结果，可以得出如下的结论。叶面喷施 SOD，富硒肥和噻苯隆对冬枣果肉的品质产生了重要影响，在一定程度上提高了果实品质。从口感品质而言，喷 SOD 可提高冬枣可溶性糖含量，降低有机酸含量。想要提高冬枣的营养价值与保健功能，喷施有机富硒肥可提高冬枣中的硒含量，提高防癌抗癌能力。喷施 SOD 可提早果实转色，促使提前上市。而喷施混合肥则可延迟果实转色，推迟冬枣上市，延长冬枣鲜果上市的时期。不同种类的叶面肥对于冬枣各个品质的效应不同，应从不同需求出发，科学合理地选用不同的叶面肥。至于喷施不同叶面肥的效应机理还需进一步研究。

[参 考 文 献]

[1] 马庆华，续九如. 不同产地冬枣果实品质差异的研究[J]. 河北农业大学学报，2007，30(2)：57-60.

[2] 360 百度，大荔冬枣. (2016-04-22)[2016-8-16]http://baike.so.com/doc/7065963-7288873.html.

[3] 高梅秀，谢纲忠，赵永泉，等. 喷施 SOD 制剂对冬枣品质和产量的影响[J]. 中国果树，2014(2)：44-46.

[4] 高德凯，梁银丽，李文平，等. 叶面喷施富硒肥对冬枣营养品质的影响及相关性分析[J]. 北方园艺，2015，39(13)：37-39.

[5] 莫海珍，张憋. 菜心富硒规律及其对营养成分的影响[J]. 食品与生物技术学报，2006，25(5)：49-54.

[6] 李百云，王春良. 噻苯隆在宁夏中部干旱带枣树上应用效果研究[J]. 黑龙江农业科学，2015(11)：75-77.

[7] 张立军，樊金娟，植物生理学试验教程[M]. 北京：中国农业大学出版社，2011：57-72.

[8] 杨昕. 硒(Ⅳ)-碘化钾—结晶紫吸光光度法测定海藻中痕量硒[J]. 理化检验：化学分册，2006，42(10)：857-858.

[9] Dhillon K S，Dhillon S K. Selenium concentrations of common weeds and agricultural crops grown in the selenium soils of northwestern India[J]. Science of the Total Environment，2009，407(24)：6150-6156.

(上接第 274 页)

[8] 张立坤，香宝，胡钰，等. 基于输出系数模型的呼兰河流域非点源污染输出风险分析[J]. 农业环境科学学报，2014，33(1)：148-154.

[9] 田甜，刘瑞民，王秀娟，等. 三峡库区大宁河流域非点源污染输出风险分析[J]. 环境科学与技术，2011，34(6)：185-190.

[10] 方广玲，香宝，杜加强，等. 拉萨河流域非点源污染输出风险评估[J]. 农业工程学报，2015，31(1)：247-254.

[11] Reckhow K H，Simpson J J. A procedure using modeling and error analysis for prediction of lake phosphorus concentration from land use information[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences，1980，37(9)：1439-1448.

[12] Johnes P J. Evaluation and management of the impact of land use change on the nitrogen and phosphorus load delivered to surface waters：The export coefficient modeling approach[J]. Journal of hydrology，1996，183(3/4)：323-349.

[13] Johnes P J，O′Sullivan P E. The natural history of Slapton Ley nature research XVIII. Nitrogen and phosphorus losses from the catchment：An export coefficient approach[J]. Field Studies，1989，7(2)：285-309.

[14] Johnes P J. An investigation of the effects of land use upon water quality in the windrush catchment[D]. Oxford：University of Oxford，1990.

[15] 应兰兰，侯西勇，路晓，等. 我国非点源污染研究中输出系数问题[J]. 水资源与水工程学报，2010，21(6)：90-95.

[16] 孟晓云，于兴修，泮雪芹. 云蒙湖流域土地利用变化对非点源氮污染负荷的影响[J]. 环境科学，2012，33(6)：1789-1794.

[17] Strauss P，Leone A，Ripa M N，et al. Using critical source areas for targeting cost-effective best management practices to mitigate phosphorous and sediment transfer at the watershed scale[J]. Soil Use and Management，2007，23(S1)：144-153.

[18] 李爽，张祖陆，孙媛媛. 基于 SWAT 模型的南四湖流域非点源氮磷污染模拟[J]. 湖泊科学，2013，25(2)：236-242.