

黄河流域农用地非点源磷污染危险性评价

宋月君¹, 刘永美², 杨洁¹, 莫明浩¹, 张利超¹

1. 江西省水土保持科学研究所, 南昌 330029
2. 山东路科信息咨询公司, 济南 250100

摘要 化肥的施用为粮食增产起到很大作用, 但不合理的施肥会对环境产生不良影响, 特别是农田养分流失将造成农业非点源污染。为了系统、全面识别黄河流域农用地磷流失风险高低的空间分布情况和主要影响因子, 服务于农业面源污染防治和现代化农业管理, 本研究以地理信息系统(GIS)的空间分析功能和养分平衡计算方法为依托, 参照国际常用的磷指数法, 对黄河流域主要农用地进行农业非点源磷污染风险评价。结果表明, 风险指数以中高为主, 分别占流域的 41.85%和 34.85%, 主要分布在黄河沿岸及中下游农业开发地区; 而低和很高的分别占 11.62%和 11.69%, 分别集中位于流域的中部地区和东部广大下游冲积平原地区, 此流域属于农用地磷流失风险指数中等流域。

关键词 黄河流域; 磷指数法; GIS 技术; ArcGIS 软件; 危险性评价

中图分类号 S157

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)11-0066-06

Risk Appraisal of the Non-point Source Phosphorus Pollution of Agriculture Land in Yellow River Basin

SONG Yuejun¹, LIU Yongmei², YANG Jie¹, MO Minghao¹, ZHANG Lichao¹

1. Jiangxi Provincial Research Institute of Soil and Water Conservation, Nanchang 330029, China
2. Shandong Province Luke Highway Information Consulting Firm, Jinan 250100, China

Abstract The application of chemical fertilizers plays a significant role in increasing the output of grain in China. However, it may also have an adverse impact on the environment, particularly, the agricultural non-point source pollution caused by agricultural nutrient loss. This paper aims to gain a systematic and full understanding of phosphorus loss risks involved in the distribution and principal factors of agricultural land in Yellow River basin, and to provide some guidance for the agricultural non-point source pollution control and the modernization management of agriculture. Based on the GIS technical and nutrient balance calculation method, with the help of the widespread applied phosphorus index method, we establish each target system and compute the phosphorus pollution risk index, and then use them to carry out the non-point source phosphorus pollution risk appraisal of the main agricultural land in the Yellow River basin. The results show that the regions which have the middle and high non-point source phosphorus pollution risk indices take, respectively, 41.85% and 34.85% of the main agricultural land, and are mainly located in the lower reaches of the Yellow River and coastal areas of agricultural development; the low and high risk regions take, respectively, 11.62% and 11.69%, and are located centrally in the middle of the river basin district and the eastern part of the vast plain area. The Yellow River basin is the middle phosphorus pollute risk basin for the agricultural land.

Keywords Yellow River basin; phosphorus index method; the GIS technology; ArcGIS software; risk appraisal

当今因化肥施用不当引起的环境问题已引起各国科学家的重视, 特别是水体的富营养化现象十分突出。磷是富营

养化主要限制因子之一, 磷在农业环境中的流失量虽然不大, 但当水体含氮充分、磷浓度达到 0.015mg/L 时, 就可能引起水

收稿日期: 2010-03-24

基金项目: 江西省水利厅科技项目(200910)

作者简介: 宋月君, 工程师, 研究方向为 3S 技术在水土保持监测方面的应用, 电子信箱: well3292@126.com

华现象发生。大面积农田中流失的磷量汇集到相对小面积的承受水面时,这种流失量就不可忽视^[1]。20 世纪 70 年代以来,中国重要的湖泊和河流水域如五大湖泊、三峡库区、滇池、白洋淀、南四湖、异龙湖等氮、磷富营养化问题急剧恶化^[2]。21 世纪初,中国农业面源污染对水体富营养化的影响进一步加剧,农业和农村发展引起的水污染将成为中国可持续发展的最大挑战之一^[2]。

20 世纪 60 年代发达国家开始关注非点源污染。20 世纪 70 年代起进行系统研究,并付诸管理实践。中国真正意义上的非点源污染研究始于北京城市径流污染的研究及 20 世纪 80 年代初的全国湖泊、水库富营养化调查和河流水质规划研究^[3]。但国内非点源污染研究范围较窄,管理实践进展也较为缓慢^[4]。

现在非点源污染的评价方法主要是磷指数评价法^[5-6]。磷指数评价法是确定流域内磷流失的关键源区和进行合理地农业非点源污染控制的有效方法。国外磷指数评价法的研究工作起步较早,但在国内这方面工作刚刚起步,还没有建立起适合中国农业特点的流域农业非点源磷污染评价指标体系和方法。本研究参考磷指数法^[3],结合养分平衡计算,在地理信息系统(Geographic Information System, GIS)技术支持下,对黄河流域农用地进行磷污染危险性评价,以识别磷素流失的关键源区。

1 研究区域概况

黄河流域横贯中国东西部,大部分区域位于中国的西北部,处于 95°53'E~119°05'E, 32°10'N~41°50'N, 东西长 1900km,南北宽 1100km,流域面积 79.5 万 km²。黄河流域幅员辽阔,地形地貌差别很大。从西到东横跨青藏高原、内蒙古高原、黄土高原和黄淮海平原四个地貌单元。流域地势西高东低,流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南、山东等 9 省(区),注入渤海,干流河道全长 5464km。黄河流域的黄土高原地区水土流失严重,大量泥沙输入黄河,淤高下游河床,是黄河下游水患严重而又难于治理的症结所在。本研究主要针对该流域的农业用地。

2 方法与数据

2.1 研究方法

磷指数评价法由 Lemunyon 和 Gilbert 在 1993 年提出^[3]。磷污染指标体系包括土壤侵蚀、地表径流、土壤磷含量、化肥和有机肥的施用量及施用方法等因子。该方法首先将影响磷流失的各因子根据其对磷流失的贡献大小赋予相应的权重,并将各因子划分为若干等级,每一级别赋予相应的等级分值,反映该因子不同的取值对磷流失风险的影响大小。将各因子对应的等级级别分值与权重相乘再相加得到磷指数(Phosphorus Index, PI),计算公式为

$$PI = \sum (\text{磷流失影响因子等级分值} \times \text{权重}) \quad (1)$$

养分平衡计算中,用养分的总输入量与总输出量之差表

示养分的盈余量,养分的总输入量与总输出量之比表示盈亏程度,比值越高,其盈余程度越大。

数据的空间分析主要用 ArcGIS 地理信息系统软件进行。

2.2 研究数据

降雨数据:由英国牛津大学、东英吉利大学环境科学学院气候研究变化中心和国际水管理协会提供相关气候观测站 1961—1990 年月平均降雨量数据。

农业统计数据:通过青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南、山东 9 省(自治区)2003 年农村统计年鉴得到所辖县市农业数据,包括各县市区的人口、耕地、农业经济数据。

DEM 数据:由美国地质勘测局(USGS)提供亚洲 Hydro 1km 分辨率的 DEM 高程数据。

土地覆被分类图:由美国橡树岭国家实验室提供 LandScan 全球 1km 分辨率的东亚土地覆被部分。

全国各要素矢量图:由国家基础地理信息中心提供全国行政区、河网矢量图。

流域划分图:由联合国粮农组织(Food and Agriculture Organization, FAO)提供流域划分图和中国可持续发展信息网水资源与水环境共享网站提供中国流域的划分图。

土壤数据:由联合国粮农组织提供 1:500 万的世界主要土壤类型分布矢量图。

研究数据为通过 ArcGIS 软件中区域子集提取得到黄河流域内的相关数据。

3 评价体系

3.1 影响因子计算

根据磷指数法,选取与农业非点源磷污染相关的 5 类主要影响因子作为评价因子,包括降雨侵蚀因子、土壤可侵蚀性因子、地形因子、单位耕地面积磷盈余量因子和输移距离因子。

3.1.1 降雨侵蚀因子

降雨量是影响侵蚀的主要因子之一^[7]。本研究采用联合国粮农组织推荐、由 Lemunyon 等^[3]提出的直接利用年平均降雨量和多年月平均降雨量推求年降雨侵蚀因子 R 值的经验计算公式

$$R = \sum_{i=1}^{12} 1.735 \times 10^{(1.5 \lg P_i^2 / P - 0.8188)} \quad (2)$$

式中, P_i 为某水文年内第 i 月多年平均月降雨量, mm; P 为平均年降雨量, mm。

利用由英国牛津大学、东英吉利大学环境科学学院气候研究变化中心和国际水管理协会提供的全球多年月平均降雨量点矢量数据(黄河流域范围),通过式(2)和 ArcGIS 的空间插值功能,得到降雨量侵蚀因子 R 的表面栅格图。

3.1.2 土壤可侵蚀因子

通常土壤侵蚀的强弱决定附着于土壤颗粒上的养分元素 P 流失的强弱,其可以作为农田中土壤养分元素 P 流失强



弱的一个指示值^[8]。土壤侵蚀过程是非点源污染研究的重要内容^[9]。

根据各土壤类型的土壤机械组成和有机质含量,参考土壤可蚀性诺谟图^[9]得到各类土壤的可侵蚀因子 K 值。以 FAO 网站提供的 1:500 万的世界主要土壤类型分布矢量图为基础图件,利用 ArcGIS 对各土壤类型斑块进行属性编辑,派生 K 值栅格图。

3.1.3 地形因子

地形因子 LS 主要有坡长和坡度确定,其中坡度是形成土壤侵蚀的根本原因,对侵蚀强度的影响也非常大。一般来说,地形的坡度越大,侵蚀的可能性也越大^[10]。

本研究采用由 W·H·维希迈尔和 D·D·史密斯提出、在中国应用得较多的计算公式^[11-13]

$$LS=(L/22)^{0.3}(\theta/5.16)^{13} \quad (3)$$

式中, L 为坡长,m; θ 为坡度,°。

通过 ArcGIS 软件的空间分析功能和式(3)对 1km 分辨率的 DEM 数据进行分析,得到黄河流域地形因子的栅格图。

3.1.4 单位耕地面积磷盈余量因子

养分的总输入量与总输出量之比表示盈亏程度,其盈余程度越大,对环境的污染风险也就越大^[12]。

单位面积磷盈余 Pa 即单位耕地面积上的磷盈余量

$$Pa=BAL/Aa \quad (4)$$

式中, Pa 为单位面积磷盈余量,t/hm²;BAL 为总磷盈余量,t; Aa 为耕地面积,hm²。

利用各县市的农业统计资料和式(4)进行全国县级行政区矢量图的属性编辑,得到各县的磷盈余情况矢量图,通过 ArcGIS 的数据转换工具得到相关栅格图。

3.1.5 输移距离因子

运用 ArcGIS 软件的距离计算功能,进行河流与相关土地利用类型之间距离的计算,得到农用地各点到河流的距离,即输移因子 D 。

3.2 评价体系建立

影响非点源污染的各个要素在相互作用的过程中,对磷素流失的贡献大小不同、重要性各异,参照磷指数法和相关研究^[14]得到的结果,给各指标赋予相应权重。

将影响磷污染环境风险的 5 个因子分为无、低、中、高和极高 5 个等级,参照磷指数法给每一级别赋予相应的等级分值,相应从低到高等级分值分别赋予的值为 0、1、2、4、8,反映该因子不同的取值对磷流失风险的影响大小,等级越高对环境风险影响越大。评价体系如表 1 所示。

表 1 评价指标体系
Table 1 Evaluation indicators system

评价因子(权重值)	磷流失强度评价(等级级别分值)				
	无(0)	低(1)	中(2)	高(4)	极高(8)
$R(1)$	<40	40~100	100~150	150~300	>300
$K(1)$	<0.1	0.1~0.2	0.2~0.3	0.3~0.4	>0.4
$LS(1)$	<1	1~5	5~10	10~20	>20
$Pa/(t \cdot hm^{-2})(1.5)$	<0	0~0.05	0.05~0.10	0.10~0.15	>0.15
$D/km(1.5)$	>66	38~66	23~38	8~23	<8

通过式(1)计算可得到磷流失风险指数 PI ,利用自然间隔分类法,进行磷流失风险指数分级。 PI 在 1~13 时,磷流失风险等级为“低”;13~20 时为“中等”;20~27 时为“高”;>27 时为“很高”。

4 结果与评价

4.1 单位耕地面积磷盈余因子

黄河流域面积比较大,跨越了中国中部和东部地区。中部地区的农田以磷低盈余和中盈余为主,而东部地区农业比较发达,盈余也以高和极高为主。流域中部地区开发耕地利用面积较少,以低盈余和中盈余为主,东部地区农业比较发达,耕地开发面积广大,投肥量大,盈余以高和极高为主(图 1)。从整个流域统计结果看,低盈余农用地在流域中所占比例最大为 31.58%,而中盈余、高盈余和极高盈余所占比例相

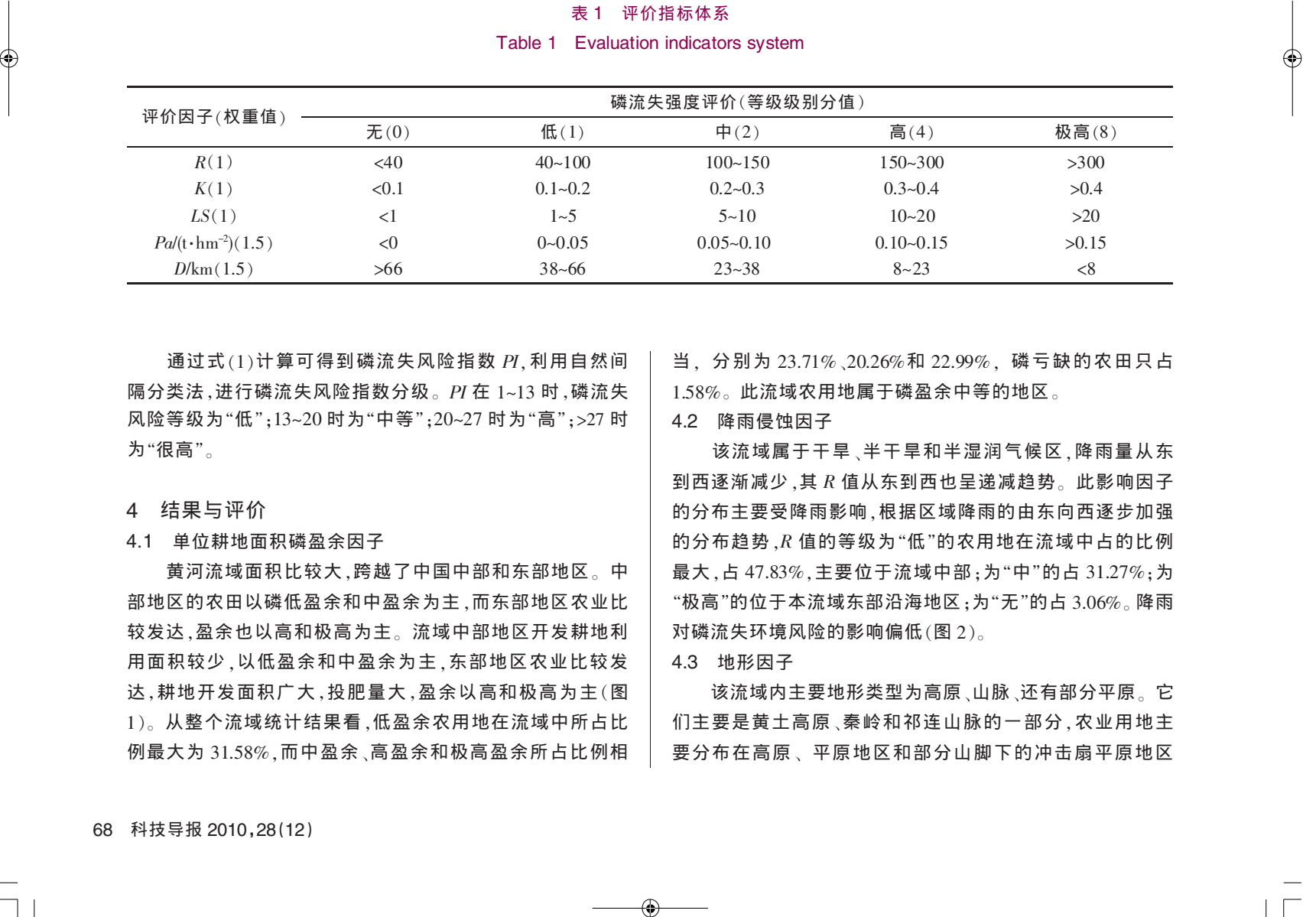
当,分别为 23.71%、20.26%和 22.99%,磷亏缺的农田只占 1.58%。此流域农用地属于磷盈余中等的地区。

4.2 降雨侵蚀因子

该流域属于干旱、半干旱和半湿润气候区,降雨量从东到西逐渐减少,其 R 值从东到西也呈递减趋势。此影响因子的分布主要受降雨影响,根据区域降雨的由东向西逐步加强的分布趋势, R 值的等级为“低”的农用地在流域中占的比例最大,占 47.83%,主要位于流域中部;为“中”的占 31.27%;为“极高”的位于本流域东部沿海地区;为“无”的占 3.06%。降雨对磷流失环境风险的影响偏低(图 2)。

4.3 地形因子

该流域内主要地形类型为高原、山脉、还有部分平原。它们主要是黄土高原、秦岭和祁连山脉的一部分,农业用地主要分布在高原、平原地区和部分山脚下的冲击扇平原地区



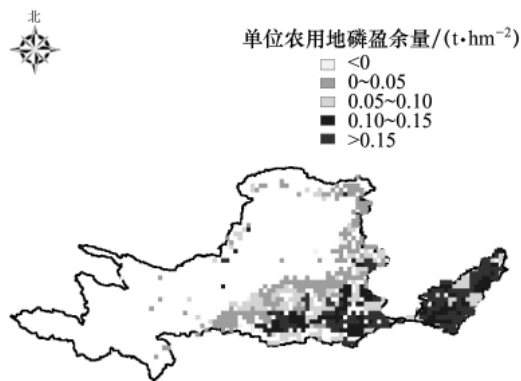


图1 农用地单位耕地面积磷盈余量
Fig. 1 P surplus for unit farmland area of cropland

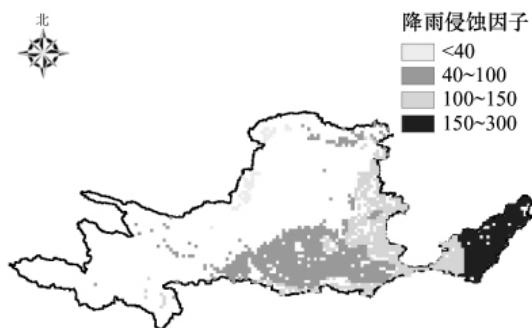


图2 农用地年降雨侵蚀分级
Fig. 2 Classification for yearly rainfall erosivity value of cropland

(图3)。黄河流域范围内农田 LS 各等级的比例为:“无”占 29.78%，“低”占 15.82%，“中”占 15.75%，“高”占 20.85%，“极高”占 17.79%。农田的不同等级地形因子所占比例都较大,地形对农田里流失环境影响比较复杂,但仍然是 $LS=0$ 的所占比例最大。



图3 农用地地形因子分级
Fig. 3 Classification for terrain factor value of cropland

4.4 土壤可侵蚀因子

该流域内土壤类型主要有潜育土、始成土、灰钙土、红砂

土、冲积土等,类型较多,土壤质地为壤土、砂质黏土、粉砂土、砂质壤土、砂土、壤质砂土等。根据联合国粮农组织网上公布数据,此处的土壤有机质含量由东向西开始,东部主要分布在 2%~10%,中部地区在 0.5%~1%,西部小于 0.5%。其 K 值分布在 0.14~0.52。本流域农田具体 K 值各等级的比例如下:“无”占 0.98%，“低”占 31.75%，“中”占 57.21%，“高”占 3.23%，“极高”占 6.84%。该流域农田 K 值大多属于中低等级(图4)。

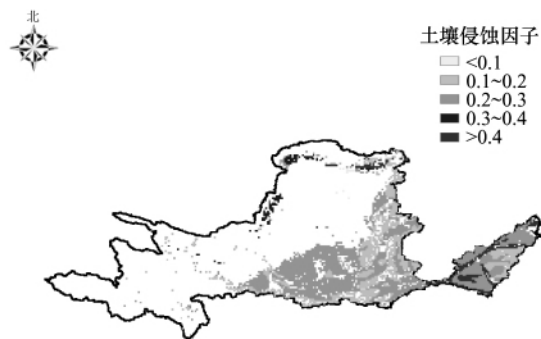


图4 农用地土壤可侵蚀因子分级
Fig. 4 Classification for soil erosion factor of cropland

4.5 输移距离因子

输移距离因子 D 的等级在流域中所占比例与各流域的河网密度相关,河网密度大,农用地到河流的距离就比较近,等级高的比例就比较大。相反,如果河网密度比较小,农用地到河流的距离比较远。在本流域河流 D 值的等级以中为主,由于受本区域地形地貌的影响,其主要分布于距离河流较远地区(图5)。



图5 输移距离因子空间分布图
Fig. 5 Distribution for transport distance factor

4.6 农用地的磷流失风险评价

该流域农田单位面积耕地磷盈余量 Pa 以低盈余所占比例最大,为 31.58%,而中、高和极高盈余所占比例差不多,分别为 23.71%、20.26%和 22.99%,磷亏缺的农田只占到 1.58%。属于磷盈余中等地区; R 值的等级为低的农田在流域中占的

比例最大为 47.83%，主要位于流域中部； R 值等级为中的农田在流域中占 31.27%，降雨对磷流失环境风险的影响偏低； K 大多属于中低等级，“低”的占 31.75%，“中”的占 57.21%。该流域河网密度中等，到河流距离在 8km 以内的农田占流域的 59.40%，到河流距离在 8~23km 的农田占 37.99%。该流域各因子所占比例最大的等级以中低为主，通过以上 5 类主要影响因子的分析，结合 ArcGIS 软件的空间运算功能，得到磷指数风险分布图。从统计结果来看，风险指数以中高为主，分别占流域的 41.85%和 34.85%，主要分布在黄河沿岸及中下游农业较发达地区，而“低”和“很高”的分别占 11.62%和 11.69%，分别集中位于流域的中部部分地区和东部广大平原地区。此流域属于农用地磷流失风险指数中等的流域(图 6)。



图 6 农用地磷素流失风险指数空间分布
Fig. 6 Phosphorus loss risk index of farmland spatial distribution

5 讨论

利用国内外科研部门提供的公开数据，在地理信息系统强大的空间分析功能和磷指数法模型体系的支持下，对国家一级流域——黄河流域范围内的农用地磷流失污染危险性进行评价，了解磷流失污染危险性在空间上的等级分布情况。

1) 在养分平衡的计算中，由于资料缺乏和指标的不确定性，研究中所选取的公式和参数都是参考相关文献得到的，没有进行区域之间模型参数的标定，使得一些地区的平衡结果与实际存在误差。以后研究中应加大实时数据搜集分析，对各影响因素进行实地调查，获取准确数据，使结果能更好反映养分盈余的情况。

2) 指标因子的选取受条件所限只选了 5 大因子，缺少植被覆盖因子、肥料施用方式等因子，且没有考虑农业管理因素。如果条件允许，可以到各地收集相关数据，加入这些参数将会使结果更好地反映实际情况。

3) 在指标因子的分级和权重的确定上，本研究主要参照相关研究学者的研究成果^[14]，使结果分析方面存在主观性。如果能加大这方面的研究并能进行实地考察检测，把结果与磷

指数的分级和权重进行相关分析将使其更加可靠合理，评价结果会更有意义和说服力。

4) 本研究模型的建立主要参照国外的磷指数法，有关磷指数法在中国大多是在小流域上进行研究应用^[14]，并得到较好的结果，但缺少大流域运用的研究。本研究是一次尝试性的探索。今后研究中，应根据流域的范围结合中国实际国情建立系统的、有针对性的评价体系和评价指标，更好地为面源污染的防治和监测提供技术支撑。

6 结论

以黄河流域主要农用地为研究单元，通过平衡计算得到单位耕地养分磷的盈亏现状，以地理信息系统软件 ArcGIS 为研究工具，利用其强大的空间分析功能，分析黄河流域非点源磷污染的空间分布情况。

1) 利用养分平衡法，以县为单位计算养分盈亏情况，根据计算和统计结果，总体上看黄河流域是盈余中等的流域。

2) 影响农业非点源污染的因子有自然因子和社会经济因子两方面。根据可获得的数据的情况，研究选取 5 个因子作为本次研究的评价因子，结合 ArcGIS 软件的空间运算功能，得到磷指数风险分布图。从统计结果看，风险指数以中高为主，分别占流域的 41.85%和 34.85%，主要分布在黄河沿岸及中下游农业开发地区，而低和很高的分别占到了 11.62%和 11.69%，分别集中位于流域的中部地区和东部广大平原地区。此流域属于农用地磷流失风险指数中等的流域。

参考文献 (References)

- [1] 何增耀. 农业环境科学概论[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1991.
He Zengyao. Introduction to environmental science [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1991.
- [2] 张维理, 武淑霞, 冀宏杰, 等. 中国农业面源污染形势估计及控制对策 I. 21 世纪初期中国农业面源污染的形势估计[J]. 中国农业科学, 2004, 37(7): 1008-1017.
Zhang Weili, Wu Shuxia, Ji Hongjie, et al. Scientia Agricultura Sinica, 2004, 37(7): 1008-1017.
- [3] 鲍全盛, 王华东. 我国水环境非点源污染研究与展望 [J]. 地理科学, 1996, 16(1): 66-71.
Bao Quansheng, Wang Huadong. Geographical Sciences, 1996, 16(1): 66-71.
- [4] 郑一, 王学军. 非点源污染研究的进展与展望 [J]. 水科学进展, 2002, 13(1): 105-109.
Zheng Yi, Wang Xuejun. Advances in Water Science, 2002, 13(1): 105-109.
- [5] Lemunyon J L, Gilbert R G. Concept and need for a phosphorus assessment tool [J]. Journal of Production Agriculture, 1993, 6: 483-496.
- [6] Wischmeier W H, Smith D D. Rainfall energy and its relationship to soil loss[J]. Transactions - American Geophysical Union, 1958, 39: 285-291.
- [7] 彭珂珊. 中国土壤侵蚀影响因素及其危害分析[J]. 水利水电科技进展, 2000, 20(4): 15-18.
Peng Keshan. Advances in Science and Technology of Water Resources,

- 2000, 20(4): 15-18.
- [8] Logan T J. The role of soil and sediment chemistry in modeling nonpoint source phosphorus [R]//Overcash M R, Davidson J M. Environmental Impact of Nonpoint Source Pollution. Ann Arbor, MI: Ann Arbor Science Publishers, 1980, 189-209.
- [9] 李清河, 李昌哲, 孙宝平, 等. 土壤侵蚀与非点源污染预测控制 [J]. 水土保持通报, 1999, 19(4): 54-57.
Li Qinghe, Li Changzhe, Sun Baoping, et al. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1999, 19(4): 54-57.
- [10] 韦中亚. 石家庄土壤侵蚀定量评价研究[J]. 水土保持研究, 1999, 6(4): 62-68.
Wei Zhongya. *Research of Soil and Water Conservation*, 1999, 6(4): 62-68.
- [11] 马志尊. 应用卫星影像估算通用土壤流失方程各因子值方法的探讨

- [J]. 中国水土保持, 1989(3): 24-27.
Ma Zhizun. *Soil and Water Conservation in China*, 1989(3): 24-27.
- [12] 孙立达, 张洪江. 几种植物保土效益的探讨——兼谈土壤流失通用方程的应用[J]. 水土保持学报, 1989, 2(5): 34-40.
Sun Lida, Zhang Hongjiang. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1989, 2(5): 34-40.
- [13] 张洪江. 通用土壤流失方程式综述 [J]. 北京林学院学报, 1985, 7(3): 73-87.
Zhang Hongjiang. *Journal of Beijing Forestry College*, 1985, 7(3): 73-87.
- [14] 张淑荣, 陈利顶, 傅伯杰, 等. 农业区非点源污染潜在风险评价——以于桥水库流域磷流失为例[J]. 第四纪研究, 2003, 23(3): 262-269.
Zhang Shurong, Chen Liding, Fu Bojie, et al. *Quaternary Sciences*, 2003, 23(3): 262-269.

(责任编辑 吴晓丽)

第33届国际燃烧会议

The 33rd International Symposium on Combustion

时 间: 2010年8月2—6日 地 点: 北京

主办单位: 国际燃烧学会
承办单位: 清华大学
协办单位: 中国工程热物理学会

通信地址: 清华大学热能工程系 (100084)
电话: 010-62782108 传真: 01062794068
电子信箱: yaoq@tsinghua.edu.cn
网站: <http://www.combustioninstitute.org>