

## 流域面源污染关键区快速识别方法的研究与应用

——以海河干流流域为例

焦永杰<sup>1</sup>, 周滨<sup>1</sup>, 刘红磊<sup>1</sup>, 李雪梅<sup>2</sup>, 邢美楠<sup>1</sup>, 司敏<sup>3</sup>, 赵文喜<sup>4</sup>, 岳昂<sup>4</sup> (1. 天津市环境保护科学研究院, 天津 300191; 2. 天津城市建设大学, 天津 300384; 3. 天津市中水科技咨询有限责任公司, 天津 300170; 4. 天津市环境监测中心, 天津 300191)

**摘要** 选择了一个下垫面受人类活动影响剧烈的研究区域——海河干流流域作为研究对象, 在综合考虑多种影响因素的基础上, 对复杂的模型进行简化, 形成一种基于“源-汇”框架以及地理信息系统(GIS)技术的流域面源污染快速评价模型, 旨在为水环境管理者提供一种快速甄别流域面源污染潜在风险的方式, 为贫数据研究区域的相关研究提供借鉴。

**关键词** 非点源污染; 地理信息系统; 框架模型; 关键区

**中图分类号** S181.3 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2017)11-0050-05

### Research and Application of Rapid Identification Methods of Critical Area for Non-point Pollution of Watershed—Taking Haihe River Basin as an Example

JIANG Yong-jie, ZHOU Bin, LIU Hong-lei et al (Tianjin Academy of Environmental Sciences, Tianjin 300191)

**Abstract** This study chosen Haihe River Basin strongly influenced by anthropogenic activities. On the basis of multi-factor comprehensively considering, a relatively simple spatial evaluation model has been developed through simplifying the complicated mechanism model. The new model was formed by combining with “source-transportation” framework and GIS technology, which can give a rapid and practical assessment method of identifying the potential non-point source loss risk to environmental regulators. And then it will provide guidance for similar research areas.

**Key words** Non-point source pollution model; GIS; Framework model; Critical area

近年来, 非点源污染在我国已引起了严重的生态环境问题, 相对于点源污染, 非点源污染具有不可控性和随机性的特点, 难以在时空上实现定点监测, 治理范围更广、难度更高, 在土壤介质中长期蓄积的污染负荷可以在短期的降雨过程中随地表径流汇入收纳水体, 造成水体恶化<sup>[1]</sup>。已有的非点源研究发现, 由于地形、降水、植被覆盖等因子的差异, 同一区域内不同景观单元输出污染负荷的难易程度不同, 某些极易输出污染负荷的汇水单元被称为非点源污染关键区<sup>[2]</sup>。科学地识别并划分敏感区, 对于在财力、物力和时间都有限的条件下制订非点源污染分期治理方案具有重要意义。

随着以“3S”技术为代表的计算机科学的不断发展, 自20世纪70年代, 陆续出现了一批基于物化及水文机理的非点源污染模型, 这类模型的出现可以有效地解决非点源污染的随机性和观测点的不确定性, 不仅可以模拟各类非点源的形成、迁移转化等过程, 还可以为非点源控制和管理的定量化提供有效的技术手段。借助流域非点源污染机理模型, 可以帮助管理者量化污染负荷, 并在空间层面快速定位污染负荷的关键区域, 现已成为研究非点源污染最直接有效的途径之一<sup>[3-4]</sup>。然而, 现有的主流非点源模型通常所需数据量较大, 且建模及操作过程通常较为繁杂, 模型率定、校准、情景模拟所需时间较长, 以目前主流的SWAT及AGNPS模型为例, 建模所需数据涵盖了地形、土壤、土地利用、气象、水文、营养物质等方面, 且需要以长时间序列、连续监测的水质数据作为模型的率定及验证数据库<sup>[5-6]</sup>, 针对不具备模型基础

的管理者及现实中大量的贫数据研究区, 该类模型的适用性通常会受到较大影响。笔者以海河干流流域为研究区域, 在兼顾机理需求的基础上, 利用地理信息系统(GIS)软件平台通过栅格叠置运算, 形成一种基于“源汇”框架的流域面源污染快速评价模型, 旨在为水环境管理者提供一种快速甄别流域面源污染的方式。

### 1 资料与方法

**1.1 研究区概况** 海河流域是我国七大水系之一, 有滦河、永定河、大清河、子牙河、漳卫南运河、马颊河等支流。海河流域流经8个省、市、自治区, 共260多个县(市、旗), 总面积3 118万km<sup>2</sup>, 包括北京市、天津市全部, 河北省绝大部分, 山西省东部, 山东、河南的北部和辽宁省、内蒙古自治区的一小部分, 为典型的扇状流域。

海河干流由于子牙河和北运河在天津市三岔口汇合后, 穿过市区在塘沽区大沽口海河闸入海, 全长72 km, 流域汇水面积2 066 km<sup>2</sup>。海河干流上游段为天津市, 中游段为开发区, 间杂农田, 下游段为滨海新区。上游河流的天然径流历来是天津市的主要水源。然而, 自建国以来, 经多年治理, 海河上游已形成节节拦蓄、处处引水、渠渠相通的新局面, 进入天津市的水量急剧减少。自20世纪80年代初, 海河干流断流天数呈明显增多趋势, 海河上游各主要支流断流和干涸呈常态化, 非汛期时段海河已无径流入海, 水资源不足和水质差是近年来这一地区面临的主要水环境问题。

**1.2 基础数据来源** 该研究所需的基础数据及来源见表1, 其中遥感数据来源为美国地质调查局(USGS)Landsat 8 OLI-TRIS(美国陆地卫星)所提供的2015年7月遥感影像, 同时利用Erdas平台的监督分类模块对遥感影像进行分析, 基于遥感影像解译数据及遥感地面核查结果得到研究区域土地利用类型及植被归一化指数(NDVI); 地形数据来自ASTER

**基金项目** 国家水体污染控制与治理科技重大专项课题(2014ZX07203-009)。

**作者简介** 焦永杰(1979—), 男, 河北邢台人, 工程师, 硕士, 从事生态修复研究。

**收稿日期** 2017-03-10

GDEM(30 m)全球数字高程模型数据;气象数据来自中国气象数据网公布的地面气象资料,该研究采用的气象数据为日值地面降水数据;土壤数据取自和谐世界土壤数据库;水质

数据来自对于目标水体的采样监测,其中总氮(TN)采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(GB 11894—89),总磷(TP)采用钼酸铵分光光度法(GB 11893—89)。

表1 基础数据及来源  
Table 1 Basic data and sources

数据类型 Data type	尺度 Scale	精度 Accuracy	数据描述 Data description	数据来源 Data source
气象数据 Meteorological data	4个站点	日值数据	降雨数据	中国气象数据网
水文数据 Hydrological data	1:25 000	—	河网分布数据	天津市水务局
地形数据(DEM) Terrain data (DEM)	1:10 000	30.0 m × 30.0 m	数字高程模型	ASTER GDEM 全球数字高程模型
土壤数据 Soil data	—	—	土壤粒径组成、有机质含量、盐基饱和度等	和谐世界土壤数据库(2012)
土地利用 Land use	1:10 000	2.5 m × 2.5 m	土地利用类型分类	遥感数据解译(Spot 5, Landsat 8 OLI 数据)
植被覆盖因子 Vegetation coverage factor	—	30.0 m × 30.0 m	归一化植被指数(NDVI)	landsat 8 OLI 数据
水环境监测数据 Water environmental monitoring data	—	月精度	断面样品采集 TN、TP	自行采样监测

**1.3 模型结构框架** Zhou等<sup>[7]</sup>在1993年最早提出了基于“源-汇”理念的非点源污染潜在流失风险评价(针对磷素)的半定量框架模型,此后大量学者根据各自研究区域的特征在这一框架的基础上对模型进行了丰富<sup>[8-9]</sup>,笔者是在这一体系的基础上对原始模型进行了部分简化,其中源因子主要考虑下垫面不同景观单元对面源污染负荷输出的直接影响,汇因子主要分别考虑降雨、下垫面植被盖度、河网侵蚀力、坡度地形及土壤类型因子[式(1)],各因子按照相应的分级标准分为5级,不同因子对应不同的等级分值,综合风险分级划分采取自然断点分级法<sup>[10]</sup>,迁移因子权重系数由特尔斐法确定<sup>[11]</sup>。

$$A = S_{\alpha} \times [\sum T_{\beta} w_{\beta}] \quad (1)$$

#### 1.4 因子匡算方法

**1.4.1 源因子。**以土地利用类型作为源因子指示指标,用地类型赋值参考前人研究中的经验值赋值<sup>[12]</sup>。

**1.4.2 迁移因子。**

**1.4.2.1 植被盖度因子(NDVI)。**利用 ERDAS IMAGINE 9.0 软件的光谱增强模块中用 Indices 命令对 OLI 影像进行 NDVI 计算[式(2)],得到研究区 NDVI 灰度图。

$$NDVI = \frac{IR - R}{IR + R} \quad (2)$$

式中,IR 为近红外光波段,R 为红光波段。

为使植被指数能够定量地反映植被信息,笔者选用植被覆盖度遥感定量模型,将 NDVI 指数进行归一化及像元恢复处理[式(3)],以达到植被覆盖量化的目的,使植被生态景观面积变化的定量评价更为直观。

$$f = \frac{NDVI - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \times 255 \quad (3)$$

式中,f 为植被覆盖度;NDVI<sub>min</sub>、NDVI<sub>max</sub> 分别表示最小、最大 NDVI。

**1.4.2.2 降水强度因子。**采用研究区域内4个地面气象站点的日值降水数据,得到研究区域多年平均降水量(1990—2015年),其中插值方法采用克里金插值算法<sup>[13]</sup>。

**1.4.2.3 河道侵蚀因子。**河道侵蚀随距离变化的衰减模型

用 Sivertun 和 Prange 确定的侵蚀量随河库距离变化的衰减公式<sup>[12]</sup>表示:

$$F(x) = \frac{0.6}{e^{0.002x} - 0.4} \quad (4)$$

式中,x 为距离河道距离。

**1.4.2.4 坡度地形因子。**地形坡度因子由 DEM 数据衍生,通过 Arcgis 平台中空间分析模型生成。

**1.4.2.5 土壤类型因子。**土壤因子数据由和谐世界土壤数据库直接获取。

$$K = \left\{ 0.2 + 0.3 \exp \left[ -0.0256 S_d \left( 1 - \frac{S_i}{100} \right) \right] \right\} \times \left[ \frac{S_i}{C_i + S_i} \right]^{0.3} \times \left\{ 1 - \frac{0.25C}{C + \exp(3.72 - 2.95C)} \right\} \times \left\{ 1 - \frac{S_d}{100} \exp \left[ -5.51 + 22.9 \left( 1 - \frac{S_d}{100} \right) \right] \right\} \quad (5)$$

式中, $S_d$ 、 $S_i$  和  $C_i$  分别为砂土、壤土及黏土含量;C 为有机碳含量。

## 2 结果与分析

### 2.1 影响因子空间分布特征

**2.1.1 土地利用。**研究区域下垫面受人类扰动剧烈,图1对区域内各类用地面积占比进行了统计,其中建设用地面积累计占比接近50%,其主要分布于海河干流流域的上游环内地区(图2a),在工业点源污染得到较好控制的情况下,城市面源污染是这一区域收纳水体污染负荷的主要来源;各类旱田(玉米-小麦轮作区域)占研究区域的22.30%(图1),其主要分布于下游沿河两岸区域(图2a),受区域人口及传统农耕模式制约,区域人均耕地面积不足200 m<sup>2</sup>,家庭式农业管理模式仍是这一区域的主导农耕模式,为了提高亩产回报率,过量施肥的现象较为普遍,特别是肥力投入较大果树种植业,过量养分在表层土壤(耕层)中的大量蓄存,是这一地区收纳水体汛期水质恶化的主要原因;草地在研究区域内面积占比较小(低于6%)(图1),作为区域面源污染的天然吸附介质,该类用地占比的减少,也加剧了收纳水体水质的进一步恶化。

**2.1.2 植被覆盖。**研究区域内下垫面为人类活动强烈扰动

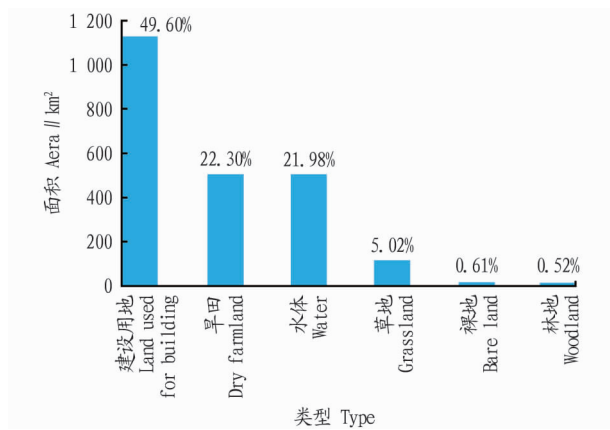


图1 2015年海河干流流域土地利用类型占地面积(比例)

Fig. 1 The area (proportion) of land use type of Haihe River Basin in 2015

区域,下垫面植被盖度较小,整体植被景观呈现破碎化、稀疏化的趋势(图2b),特别是海河干流上游流域,整体植被盖度低于25%,下游非建成区植被覆盖情况有所好转,受人类活动扰动较少的南部区域及北部部分区域植被盖度有所增加,根据遥感解译情况,高植被盖度的区域可以达到70%以上。

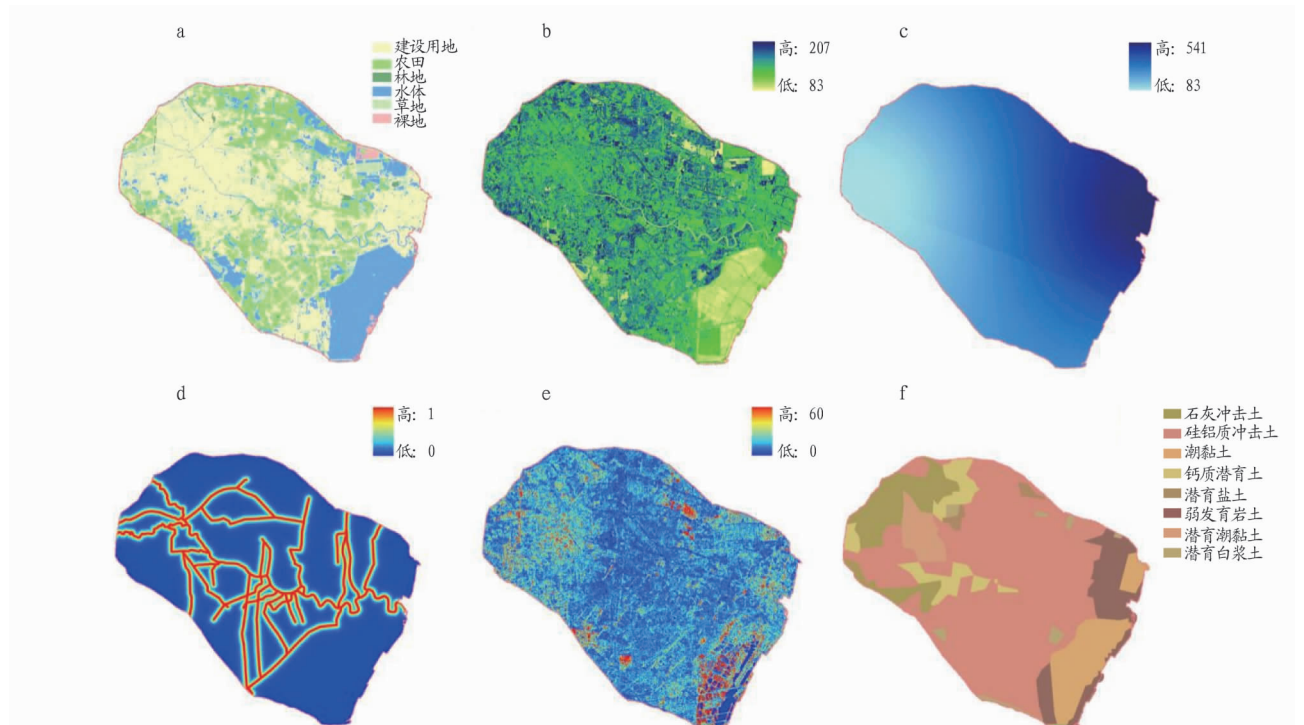
**2.1.3 降水强度。**通过对研究区域4个气象站点近25年的

年度平均降水量进行统计,并借助空间插值算法得到图2c,由此发现,区域内降水强度空间分布较为明显,东部沿河区域普遍高于西部建成区,最高年年降水量达到541mm,这一降水强度的分布特征也从降水驱动层面解释了下游面源污染负荷普遍高于上游的原因。

**2.1.4 河道侵蚀。**随着污染源距离收纳水体的距离不同,污染物入河量也不同,基于这一理论假设,参照前人的研究成果,得到河道侵蚀因子的空间分布(图2d),总体上下游地区的河网密集程度要高于上游地区,致使下游地区成为面源污染的潜在高发区。

**2.1.5 坡度地形。**研究区域位于九河下梢,地势较为低洼,坡度总体差异性不大(图2e),上游总体坡度偏高,下游偏低。

**2.1.6 土壤类型。**土壤类型空间分布如图2f所示,据调查,研究区域上游表层土壤有机质含量较高,且土壤质地相对黏重,以海津大桥为界的下游流域,表层土壤砂土含量普遍升高(大于37%),根据美国制(USDA)粒级划分标准定义,下游地区土壤粒级为粉壤土或壤土,在土壤有机质含量较小的背景下(小于0.6%),土壤中的持养能力较弱,随暴雨径流流失的风险性较高。



注:a.土地利用因子;b.植被覆盖因子;c.降水强度因子;d.河道侵蚀因子;e.坡度地形因子;f.土壤类型因子

Note: a. Land use factor; b. Vegetation cover factor; c. Precipitation intensity factor; d. Channel erosion factor; e. Slope terrain factor; f. Soil type factor

图2 “源-汇”框架模型影响因子空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of influence factors of “source-sink”

**2.2 综合评价结果空间特征**按照式(1)的模型架构得到最终评价结果,按照自然断点分级法,对评价区域依次分为5个风险级别:低风险区、中低风险区、中风险区、中高风险区及高风险区(图3)。总体上看,海河干流上游流域总体风险较小,由于上游主要位于建成区,在没有外来点源污染负荷

的背景下,城市面源污染是该地区优先防控的对象,河网周边区域的风险性略高于其他区域;而下游沿河区域是研究区域防控的重点区域,沿河两侧及汇水区内的农业种植区,特别是干流临近区域,将是未来面源污染防控的重点区域,受区域降雨时空分布的影响,过量的养分在表层土壤中长期蓄

积,通过短期暴雨径流汇入收纳河道水体,形成直接的污染负荷。此外,统计了各个风险区的面积占比(图 4),发现中高风险区及高风险区面积占较小(累计占比低于 18%),这与以往的相关研究类似<sup>[2,14-15]</sup>,即少数关键区域是污染负荷的贡献主体。从流域管理的层面出发,借助评价结果,可使

管理者能够集中有限的物力、财力,精确定位流域中的水环境治理的关键区域,对中高风险区及高风险区开展针对性、集中性治理,提高流域管理的效率,降低管理成本。

**2.3 水质数据佐证** 为了对该模型的总体评价结果进行验证,对海河干流进行了自上而下的布点监测(图 5),监测时间覆盖了 2015 年全年,监测频次为每月 1 次,监测指标包括营养盐、有机污染物、pH、重金属等 12 项指标。为切合该次面源污染负荷的研究主题,仅对 TN、TP 2 项营养盐指标进行汇总分析(图 6),结果显示,全年氮、磷的空间分布和模型评价结果基本一致,全年上游及中游区域的水体养分含量水平相对较低,且全年波动不大,下游区域水体养分含量显著上升,TN 全年平均浓度接近 5 mg/L,TP 全年平均浓度接近 0.5 mg/L,均劣于地表水 V 类限值(超标倍数超过 200%),这也从侧面佐证了下游区域存在较高面源污染风险的评价结果。

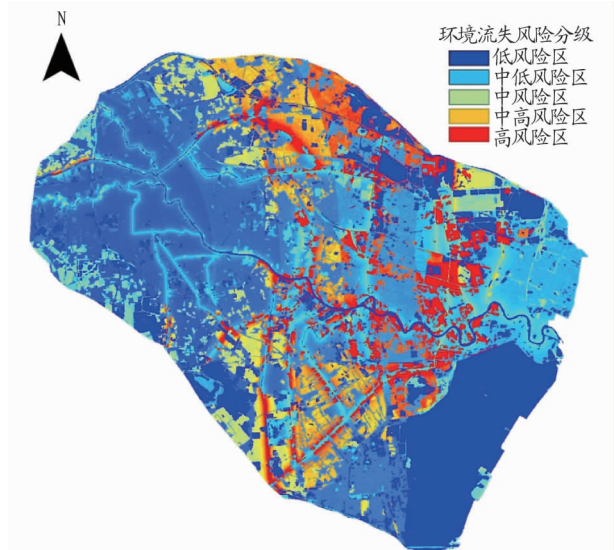


图 3 海河干流流域污染负荷流失风险分级空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of pollution load loss in Haihe River Basin

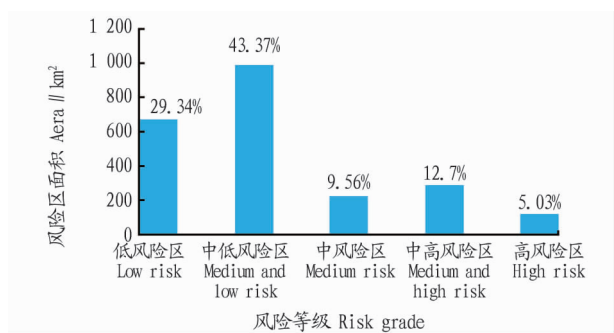


图 4 海河干流流域污染负荷流失风险分级区面积(占比)

Fig. 4 The area (proportion) of the pollution load loss in the Haihe River Basin

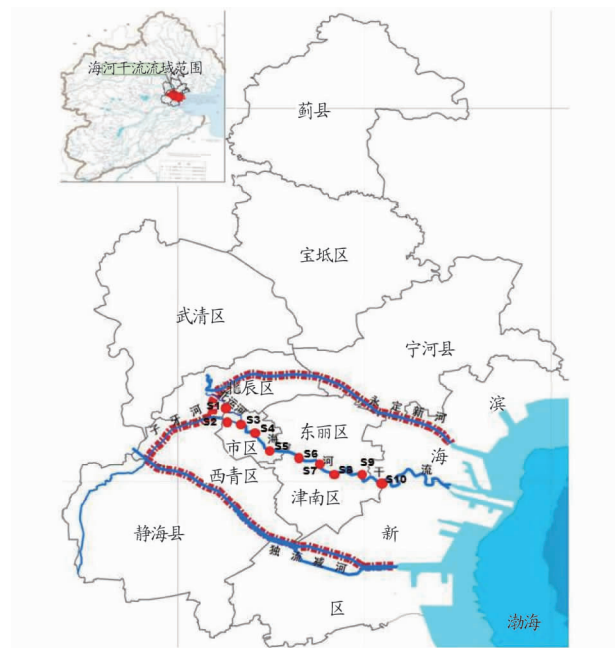


图 5 采样点位分布

Fig. 5 Sampling point distribution

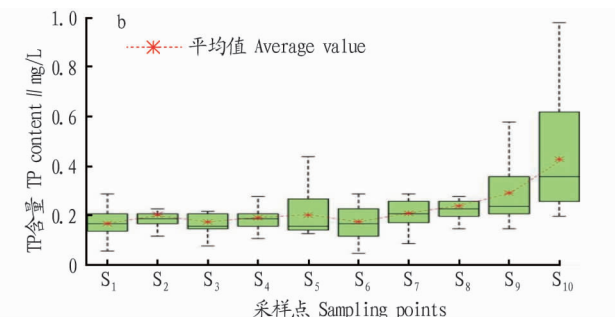
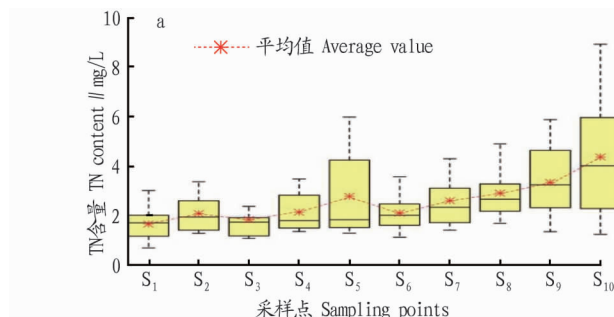


图 6 2015 年海河干流断面 TN、TP 含量监测结果

Fig. 6 Monitoring results of TN and TP contents in the Haihe River Section in 2015

### 3 结论

该研究以海河干流流域为研究对象,在前人对面源污染负荷评估模型的基础上,对前人应用模型进行简化,形成一种基于“源汇”框架及 GIS 技术的流域面源污染多因子的快

速评价模型,通过对风险等级的空间定量输出,发现海河干流流域上游区域整体水环境风险较小,城市面源是这一区域水环境管理的重点,而下游沿河涉农区域是整个流域面源污染的高发区域,潜在流失风险明显高于中上游区域,但中高



风险区以及中高风险区的总体面积占比较小,进一步印证了“少数关键区域”在整体面源污染防治中的重要作用,通过将评价结果和水质监测数据的比对,发现模型可以较好地概括流域面源污染的潜在流失风险,该模型可以为水环境管理者提供一种相对可靠且建模成本较低的面源污染风险评价方式,以期为后续其他贫数据研究区域的相关研究提供借鉴,为高效化的流域水环境管理提供支撑。

### 参考文献

- [1] 付永锋,陈文辉,赵基花.非点源污染的研究进展与前景展望[J].山西水利科技,2003(3):32-35.
- [2] 庞靖鹏,徐宗学,刘昌明,等.基于GIS和USLE的非点源污染关键区识别[J].水土保持学报,2007,21(2):170-174.
- [3] 郑涛,穆环珍,黄衍初,等.非点源污染控制研究进展[J].环境保护,2005,1(2):31-34.
- [4] 马蔚纯,陈立民,李建忠,等.水环境非点源污染数学模型研究进展[J].地球科学进展,2003,18(3):358-366.
- [5] NEITSCH S L,ARNOLD J G,KINIRY J R,et al. Soil and Water Assessment Tool theoretical documentation: Version 2009[R]. Texas: Texas Water Resources Institute, 2011.
- [6] BINGNER R L,THEURER F D,YUAN Y. AnnAGNPS technical processes [R]. Oxford: USDA - ARS National Sedimentation Laboratory, 2003.

- [7] LEMUNYON J L,GILBERT R G. The concept and need for a phosphorus assessment tool[J]. Journal of production agriculture, 1993, 6(4): 483-486.
- [8] BUCZKO U, KUCHENBUCH R O. Phosphorus indices as risk-assessment tools in the USA and Europe: A review[J]. Journal of plant nutrition and soil science, 2007, 170(4): 445-460.
- [9] BECHMANN M, KROGSTAD T, SHARPLEY A. A phosphorus index for Norway[J]. Acta agriculturae scandinavica, section b-soil and plant science, 2005, 55(3): 205-213.
- [10] ZHOU B, VOGT R D, LU X Q, et al. Land use as an explanatory factor for potential phosphorus loss risk, assessed by P indices and their governing parameters [J]. Environmental science: Processes & Impacts, 2015, 17(8): 1443-1454.
- [11] 朱长超. 特尔斐法[J]. 社会科学, 1986(5): 70, 69.
- [12] SIVERTUN Å, PRANGE L. Non-point source critical area analysis in the Gisselø watershed using GIS [J]. Environmental modelling & Software, 2003, 18(10): 887-898.
- [13] OLIVER M A, WEBSTER R. Kriging: a method of interpolation for geographical information systems [J]. International journal of geographical information system, 1990, 4(3): 313-332.
- [14] 张涛, 邓小文, 周滨, 等. 改进USLE模型及其在桥水库非点源污染敏感区划分中的应用[J]. 城市环境与城市生态, 2010(1): 29-31.
- [15] 陈梅. 农业面源污染风险评估及分级区划研究[D]. 南京: 南京大学, 2014.

(上接第18页)

重的遗传力相对较低,其狭义遗传力只有0.22。遗传力低说明它易受盐胁迫之外的环境影响。

表6 盐胁迫下主要性状遗传力分析

Table 6 Main trait heritability analysis under salt stress

性状 Trait	广义遗传力( $hB^2$ ) Broad heritability	狭义遗传力( $hN^2$ ) Narrow heritability
株高 Plant height	0.52	0.33
单株穗数 Panicles per plant	0.43	0.37
单株粒重 Grain weight per plant	0.37	0.22

### 3 结论

小麦耐盐性鉴定的最适时期是小麦返青至拔节阶段,而根系发育情况应作为小麦耐盐性研究和耐盐性育种的重要目标性状;小麦耐盐性强的品种一般出苗率高,根系发达、分蘖能力强、成穗率高、籽粒较小,冬前生长稳健,返青晚,起身后生长发育快,后期叶片功能期长,成熟期偏晚<sup>[9]</sup>;耐盐性不仅有倾母遗传现象,而且受核基因控制,与细胞质有一定关系;耐盐亲本与不耐盐亲本相互杂交,无论正交和反交,主要

农艺性状 $F_1$ 均表现出一定的杂种优势,优势率依次为产量、成穗数、分蘖数、千粒重和穗粒数;在选育耐盐品种时,对株高、单株穗数等遗传力较高的性状应早代选择,甚至 $F_1$ 代就可以根据组合的表现予以取舍,对单株粒重早代选择效果差,粒重宜推迟选择。

### 参考文献

- [1] 郭平银,王凤池,蔡家滨,等.提高小麦耐盐性的技术途径综述[J].安徽农学通报,2007,13(11):130-131.
- [2] 陆莉,张建国,张铁恒.环渤海低平原盐碱地小麦高产栽培技术[J].作物研究,2007(3):176-178.
- [3] 马灿玲,张凤瑞,王红卫,等.不同小麦品种的耐盐性比较研究[J].信阳师范学院学报(自然科学版),2007,20(4):442-444,451
- [4] 赵松山,王奉芝,陆丽,等.抗旱耐盐型小麦品种沧麦6001的选育[J].华北农学报,2000,15(S1):113-117.
- [5] 赵锁劳,窦延玲.小麦耐盐性鉴定指标及其分析评价[J].西北农业大学学报,1998,26(6):80-84.
- [6] 郭晓丽,时丽冉,白丽荣,等.不同小麦品种的耐盐性研究[J].江苏农业科学,2008(4):43-45.
- [7] 霍鹏,李士磊,李卫华.春小麦苗期耐盐性差异及聚类分析[J].石河子大学学报(自然科学版),2013,31(2):137-142.
- [8] 郭宝生,杨凯,宋景芝,等.西藏小麦耐盐性鉴定及分析[J].植物遗传资源科学,2001,2(2):36-39.
- [9] 刘艳丽,许海霞,刘桂珍,等.小麦耐盐性研究进展[J].中国农学通报,2008,24(11):202-207.

### 名词解释

扩展总被引频次:指该期刊自创刊以来所登载的全部论文在统计当年被引用的总次数。这是一个非常客观实际的评价指标,可以显示该期刊被使用和受重视的程度,以及在科学交流中的作用和地位。

扩展影响因子:这是一个国际上通行的期刊评价指标,是E·加菲尔德于1972年提出的。由于它是一个相对统计量,所以可公平地评价和处理各类期刊。通常,期刊影响因子越大,它的学术影响力和作用也越大。具体算法为:

$$\text{扩展影响因子} = \frac{\text{该刊前两年发表论文在统计当年被引用的总次数}}{\text{该刊前两年发表论文总数}}$$

扩展即年指标:这是一个表征期刊即时反应速率的指标,主要描述期刊当年发表的论文在当年被引用的情况。具体算法为:

$$\text{扩展即年指标} = \frac{\text{该期刊当年发表论文在统计当年被引用的总次数}}{\text{该期刊当年发表论文总数}}$$