

# 安徽省淮河流域湿地土壤养分流失及水质动态研究

奚立平<sup>1</sup>, 张乐勤<sup>2</sup>, 李荣富<sup>2</sup>

(1. 安徽水利水电职业技术学院, 合肥 230601; 2. 安徽农业大学资源环境学院, 合肥 230601)

**摘要:** 以淮河流域(安徽段)湿地为研究区域, 连续3 a(2012—2014年)在野外调查和室内分析的基础上, 采用定点实地调查、土壤和水质采样相结合的方法, 研究了不同水期(平水期、丰水期和枯水期)淮河流域湿地土壤养分流失、水质动态及湿地植被多样性特征, 并运用冗余分析(RDA)和偏相关分析手段揭示不同水期淮河流域湿地植被多样性与环境因子之间的关系。结果表明: (1)淮河流域湿地植被 Shannon-Wiener 多样性指数( $H'$ )、Pielou 均匀度指数( $J'$ )、Margalef 种类丰富度指数( $d_{Mi}$ ) 在丰水期达到最高, 平水期和枯水期较低, 基本表现为丰水期>枯水期>平水期, Simpson 优势度指数( $D$ ) 基本表现为平水期>枯水期>丰水期。(2)不同水期土壤 pH、电导率、全盐和总孔隙度在 0—40 cm 剖面上变化趋势基本一致, 不同水期土壤 pH 随土层深度的增加而增加, 电导率和全盐含量呈先降低后增加趋势, 土壤总孔隙度呈降低趋势。(3)随着水期的变化, 土壤 DP、K<sup>+</sup>、SEP 和 SEK 呈增加趋势, 在枯水期达到峰值, 平水期最低, 基本表现为枯水期>丰水期>平水期, 土壤 DP、K<sup>+</sup> 和 SEK 增加幅度逐渐增加, 而土壤 SEP 增加幅度逐渐减小, 以 SEK 含量波动较大。(4)水温、TN、TP、BOD<sub>5</sub> 和 COD<sub>Cr</sub> 呈一致的变化规律, 随水期的变化呈先增加后降低趋势, 透明度呈“V”字形变化规律, 基本表现为平水期>枯水期>丰水期。(5)偏相关分析显示, 不同水期淮河流域湿地植被多样性均与透明度呈极显著的负相关( $P<0.01$ ), 透明度能够反映出淮河湿地植被多样性及水质状况, 影响平水期和枯水期植被多样性主要因子为 BOD<sub>5</sub> 浓度和 COD<sub>Cr</sub> 浓度, 影响丰水期植被多样性主要因子为 TN 浓度和 TP 浓度。

**关键词:** 安徽省; 淮河流域; 湿地; 土壤养分流失; 水质动态

中图分类号: X171; X37

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2016)01-0131-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2016.01.025

## Study on Soil Nutrient Loss and Water Quality Dynamics of Wetland in Huaihe River Basin of Anhui Province

XI Liping<sup>1</sup>, ZHANG Leqin<sup>2</sup>, LI Rongfu<sup>2</sup>

(1. Anhui Hydropower Vocational Technical College, Hefei 230601; 2. College of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036)

**Abstract:** On the basis of field investigation (field survey in fixed positions), soil and water sampling and laboratory analysis in 3 consecutive years (2012—2014), the water quality dynamics, soil nutrient loss and wetland plant diversity in average season, flood season and dry season in Huaihe River Basin were studied, and the relationships between wetland plant diversity and environmental factors (soil nutrient loss and water quality index) were analyzed by the method of redundancy analysis (RDA) and partial correlation analysis. The results showed that: (1) In Huaihe River Basin, there were seasonal variation in wetland plant diversity, with the Shannon-Wiener diversity index ( $H'$ ), Pielou evenness index ( $J'$ ) and Margalef richness index ( $d_{Mi}$ ) all listing in the order of flood season>dry season>average season, and the Simpson dominance index ( $D$ ) following the sequence of average season>dry season>flood season. (2) The soil pH, conductivity, total salt content and the total porosity showed similar changing trends in 0—40 cm soil layer across different water seasons. With the increase of soil depth, soil pH increased, soil conductivity and total salt content decreased at first and then increased, and the total soil porosity decreased. (3) The concentrations of DP, K<sup>+</sup>, SEP and SEK in soil increased with the changing water seasons, which listed in the order of dry season>flood season>average season. The increase extents of DP, K<sup>+</sup> and SEK gradually increased, while that of SEP gradually decreased, and the concentration of SEK significantly fluctuated. (4) The water temperature, TN, TP, BOD<sub>5</sub> and COD<sub>Cr</sub> had the same variation trend, which increased at first and then decreased with the changing water seasons, while transparency

收稿日期: 2015-08-24

基金项目: 安徽省教育厅重点研究项目(2014BC2563); 安徽水利水电职业技术学院校级规划项目(2013CH-014)

第一作者: 奚立平(1969—), 男, 安徽无为, 硕士, 副教授, 主要从事湿地生态学及水土流失与防治等研究。E-mail: Leep\_xi@126.com

showed a "V" trend, following the order of average season > dry season > flood season. (5) Partial correlation analysis showed that wetland plant diversity showed extremely significant negative correlation with transparency ( $P < 0.01$ ) across different water seasons, which suggested that the water transparency could reflect the wetland plant diversity and the water quality of wetland in Huaihe River Basin. The concentrations of  $BOD_5$  and  $COD_{Cr}$  were the main influencing factors of wetland plant diversity in dry season and average season, while the concentrations of TN and TP were the main influencing factors in flood season.

**Key words:** Anhui; Huaihe River Basin; wetland; soil nutrient loss; water quality dynamics

湿地又称为“地球之肾”,是水—陆交互作用下独特的具有高度多样性的生态系统<sup>[1-2]</sup>。作为水陆之间的过渡地带,具有独特的生态结构与功能<sup>[3-4]</sup>。河流湿地拥有丰富的自然资源,集调蓄洪水、丰富生物多样性、改善生态环境、农业灌溉和工业生产等多种功能,对于维系流域的生态系统平衡及可持续发展具有重大作用<sup>[1,5-7]</sup>。淮河流域拥有众多湿地,是我国古文明的发祥地、重要的农业区和人口密集区。流域湿地种类繁多,包括众多大型湖泊、沼泽、人工湿地和滨海,它们在流域的水文调节、水资源供给、水质净化等方面发挥着重要的生态服务功能<sup>[3,8]</sup>。但近年来,随着流域人口的增加,尤其随着工业化和城镇化的进程,围水围海造田、地下水超采等对湿地持续的开发利用,导致湿地面积急剧缩小,生态功能快速弱化,湿地功能也遭到了严重破坏,造成了淮河流域湿地植被生产格局改变、土壤养分流失和水质的变迁<sup>[9-10]</sup>。因此探讨淮河流域湿地水质变化规律及其影响因素对合理配置水资源、改善水质环境及进行湿地保护具有重要的参考价值。

作为众多直接梯度分析方法的一种,冗余分析(RDA, Redundancy Analysis)能从统计学的角度来有效评价一个或一组变量与另一组多变量数据之间的关系,经过一系列转换、筛选后,能够有效地简化变量的个数,为研究者进一步简化分析创造条件,这样,在不同的变量组合下仍可进行单个变量的统计学特征描述,进而决定变量的取舍<sup>[11]</sup>。因此,本文通过连续 3 a(2012—2014 年)在不同水期定期、定点监测淮河流域水质指标,分析了淮河流域湿地植被、水质分布特征,并在此基础上将湿地植被多样性数据作为响应变量,用其他环境因子来作为解释变量,利用多元统计分析手段(主要是 RDA)提取能显著解释影响水质变迁及植被分布格局的主要指标,进而阐述影响不同水期淮河流域湿地植被多样性的主要环境因子,以期了解湿地变化过程及成因,为流域尺度上的湿地恢复和保育提供参考,对今后淮河流域甚至安徽经济的可持续发展和生态环境的改善有着重要的意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

淮河流域地处我国东部,东经  $111^{\circ}55'$ — $121^{\circ}25'$ ,

北纬  $30^{\circ}55'$ — $36^{\circ}36'$ ,介于长江和黄河两流域之间,全长约 1 000 km,总落差约 200 m。发源于河南省桐柏山、伏牛山,跨河南、安徽、山东、江苏 4 省 40 市 181 县(市),总面积为  $2.7 \times 10^5 \text{ km}^2$ ,是我国南北方的天然分界线,其中淮河水系从淮源到洪河口为上游,洪河口至洪泽湖(出口)中渡为中游,洪泽湖中渡以下为下游。淮河干流以南为亚热带气候,以北是暖温带气候,由于位于南北气候过渡带,并且处于海洋向内陆的过渡区,所以淮河流域的降水时空分布变化大,淮河流域作为南北气候过渡带,四季分明,雨热同季,气候多变,易发生极端天气。这里气温南高北低,年均气温约为  $13 \sim 16^{\circ}\text{C}$ 。域内降水时空分布不均,具有南部多,北部少,山区多,平原少,年内降水分配集中(多集中于汛期),年际变化大的特点,多年平均降水量约为 878 mm,受冷暖空气交替影响,四季分明,夏季高温多雨,冬季寒冷干燥,汛期为 5—10 月,依据统计资料显示,淮河流域存在明显的丰水期(5—10 月)、枯水期(12 月至翌年 2 月)和平水期(11 月、3 月和 4 月)<sup>[9-10]</sup>。淮河流域安徽段地处淮河中游,流经阜阳、六安、淮南、蚌埠、滁州 5 市 10 县(市),长约 420 km,平水流量  $1\,334 \text{ m}^3/\text{s}$ ,平水面积  $6\,200 \text{ hm}^2$ ,流域面积  $6.69 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ,占安徽省国土面积的 48.1%,该地区地形地貌特征为大平小不平,岗冲交错,水系复杂,除淮河干流外,两岸分布着一连串的天然与人工湿地,为安徽省重要的湿地分布区。

### 1.2 样品测定

1.2.1 湿地植被调查 2012—2014 年分别在 4 月 12 日(平水期)、8 月 15 日(丰水期)、12 月 3 日(枯水期)定期定点在淮河流域湿地调查湿地植被组成和采集水质和土壤样品,流域段布设 3 个采样点(3 个重复),水质采样点在离岸边 500 m 以内(水深 20 cm),现场测定水温、透明度, pH 和采用多参数水质监测仪(HI—9828)测定,定性、定量采集样品并测定水质状况。土壤采样点设在岸边,五点混合法使用 PVC 管和抓取式采样器采集土壤样品并混合,以 0—10 cm, 10—20 cm, 20—30 cm 和 30—40 cm 分层多点取样,同层土壤混匀作为分析样。将土壤样品运回实验室,风干后除去肉眼可见的碎石、植被残体等杂质,自然风干(20 d)去除碎片和部分根后过 2 mm 筛以备

待用。

选用 Margalef 丰富度指数( $d_{Ma}$ )、Shannon-Wiener 多样性指数( $H$ )、Simpson 优势度指数( $D$ )和 Pielou 均匀度指数( $J_P$ )<sup>[12]</sup>进行评价。

$$d_{Ma} = (S-1)/\ln N$$

$$H = -\sum (P_i \ln P_i)$$

$$D = 1 - \sum (P_i)^2$$

$$J_P = H/\ln S$$

式中: $P_i$  为第  $i$  类植被种类所占群落总数的百分比; $S$  为种群数目; $N$  为湿地植被总数。

1.2.2 土壤样品测定 pH 用电极电位法测定(1:2.5 土水比);电导率(EC)采用多功能测定仪测定;全盐(TS)采用电导法测定;总孔隙度( $P$ )采用容重法测定;溶解态磷(DP)浓度采用钼蓝比色法测定,钾离子( $K^+$ )浓度采用原子吸收分光光度计测定;浸提态磷(SEP)含量采用 0.5 mol/L  $NaHCO_3$  浸提,钼锑抗比色法测定;浸提态钾(SEK)含量采用 1.0 mol/L 中性醋酸铵溶液浸提,原子吸收分光光度计测定<sup>[13-14]</sup>。

1.2.3 水质样品测定 水质测定项目包括 TN、TP、 $BOD_5$  和  $COD_{Cr}$ 。 $BOD_5$  采用稀释接种法; $COD_{Cr}$  采用重铬酸钾氧化法;TN 采用过硫酸钾—紫外分光光度法;TP 采用钼锑抗分光光度法<sup>[15]</sup>。

### 1.3 数据处理

Excel 2007 和 SPSS 18 软件进行数据统计和方差检验,以 2012—2014 年的平均值±标准误差表示,显著性用 LSD 法,所有原始数据进行对数转换;变量的显著性经过的蒙特卡洛(Monte Carlo)检验(499 次),CANOCO 4.5 版本对湿地植被多样性与环境因子进行 RDA 冗余分析;为排除其他因子的干扰,利用偏相关系数分析各环境水质因子与淮河流域湿地植被多样性的关系。

## 2 结果与分析

### 2.1 淮河流域湿地植被动态特征

湿地植被多样性指数具有重要的生态学指示意义,为了避免采用单一的多样性指数来解释湿地植被多样性的偏差,研究采用 Shannon-Wiener 多样性指数( $H$ )、Pielou 均匀度指数( $J_P$ )、Margalef 种类丰富度指数( $d_{Ma}$ )以及 Simpson 优势度指数( $D$ ),从不同水期对淮河流域湿地植被多样性进行分析。由表 1 可知,淮河流域湿地植被丰富度指数、多样性指数和均匀性指数均较低,随着水期的变化,丰富度指数、多样性指数和均匀性指数呈先增加后降低趋势,在丰水期各指数明显达到峰值,平水期最低,基本表现为丰水期>枯水期>平水期,局部有所波动;丰水期丰富度指数和多样性指数均显著高于平水期和枯水期( $P$

<0.05),平水期和枯水期丰富度指数、多样性指数和均匀性指数差异均不显著( $P>0.05$ );优势度指数呈先降低后增加趋势,在丰水期达到最低,平水期最高,基本表现为平水期>枯水期>丰水期。其中,丰富度指数变化范围在 6~15 之间,多样性指数变化范围在 0.5~1.4 之间,优势度指数变化范围在 0.53~0.62 之间,均匀性指数变化范围在 0.59~0.73 之间。

表 1 淮河流域湿地植被动态特征

不同水期	$d_{Ma}$	$H$	$D$	$J_P$
平水期	6±2b	0.5±0.1b	0.62±0.09a	0.59±0.12b
丰水期	15±4a	1.4±0.4a	0.53±0.06a	0.73±0.19a
枯水期	8±3a	0.9±0.3b	0.57±0.13a	0.69±0.15ab

注:同列数据后不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ )。下同。

### 2.2 淮河流域湿地水土流失特征

2.2.1 淮河流域湿地土壤理化性质动态特征 淮河流域湿地土壤理化性质动态特征如下表所示,由表 2 可知,不同水期土壤 pH、电导率、全盐和总孔隙度在 0—40 cm 剖面上变化趋势基本一致,不同水期淮河流域湿地土壤 pH 变化范围为 5.72~6.17,土壤电导率变化范围为 79.63~85.72  $\mu S/cm$ ,土壤全盐变化范围在 29.48%~31.49%,土壤总孔隙度变化范围为 46.66%~47.63%。不同水期土壤 pH 随土层深度的增加而增加,0—40 cm 剖面土壤 pH 平均值表现为平水期>丰水期>枯水期,并且平水期显著高于枯水期( $P<0.05$ ),相同土层土壤 pH 基本表现为平水期>丰水期>枯水期,局部有所波动;不同水期土壤电导率随土层深度的增加呈先降低后增加趋势,0—40 cm 剖面土壤电导率平均值表现为枯水期>丰水期>平水期,并且不同水期土壤电导率平均值差异均显著( $P<0.05$ ),相同土层土壤电导率基本表现为枯水期>丰水期>平水期,局部有所波动;不同水期土壤全盐随土层深度的增加呈先降低后增加趋势,0—40 cm 剖面土壤全盐平均值表现为枯水期>丰水期>平水期,并且不同水期土壤电导率平均值差异不显著( $P>0.05$ ),相同土层土壤电导率基本表现为枯水期>丰水期>平水期,局部有所波动;不同水期土壤总孔隙度随土层深度的增加呈降低趋势,0—40 cm 剖面土壤总孔隙度平均值表现为枯水期>丰水期>平水期,并且枯水期显著高于平水期和丰水期( $P<0.05$ ),平水期和丰水期差异不显著( $P>0.05$ ),相同土层土壤总孔隙度基本表现为枯水期>丰水期>平水期,局部有所波动。

2.2.2 淮河流域湿地土壤养分流失动态特征 湿地土壤养分流失具有重要的生态学指示意义,主要以溶解态和浸提态流失<sup>[13-14]</sup>。本研究采用土壤 DP、 $K^+$ 、SEP 和 SEK,从不同水期对淮河流域湿地土壤养分

流失动态特征进行分析。由表 3 可知,淮河流域湿地土壤 DP、K<sup>+</sup>、SEP 和 SEK 含量均较高,说明淮河流域湿地土壤养分流失较为明显。随着水期的变化,土壤 DP、K<sup>+</sup>、SEP 和 SEK 含量呈增加趋势,在枯水期达到峰值,平水期最低,基本表现为枯水期>丰水期>平水期,土壤 DP、K<sup>+</sup> 和 SEK 增加幅度逐渐增加,而土壤 SEP 含量增加幅度逐渐减小。土壤 DP 浓度变化范围在 15.68~29.37 mg/L 之间,K<sup>+</sup> 浓度变化

范围在 32.18~65.37 mg/L 之间,SEP 含量变化范围在 231~489 mg/kg 之间,SEP 含量变化范围在 456~1 236 mg/kg 之间。其中以 SEK 含量波动较大,其主要原因可能是淮河流域湿地土壤容易诱发细沟侵蚀,SEK 含量时常被径流携带出地表。从养分流失过程来看,土壤养分含量随着水期逐渐衰减,衰减过程和衰减速率均因土壤养分特性和理化性质不同而表现各异。

表 2 淮河流域湿地土壤理化性质动态特征

不同水期	土层深度/cm	pH	电导率( $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ )	全盐/%	总孔隙度/%
平水期	0—10	6.02±0.56	85.45±6.12	35.14±2.18	48.41±1.06
	10—20	6.13±0.32	81.37±7.25	31.08±1.37	47.12±1.57
	20—30	6.15±0.48	75.24±9.36	26.37±1.58	45.89±1.23
	30—40	6.37±0.69	76.38±8.24	25.31±2.03	45.23±2.15
	平均	6.17±0.51a	79.63±7.74c	29.48±1.79a	46.66±1.50b
丰水期	0—10	5.56±0.79	86.39±9.23	35.56±1.59	48.23±2.31
	10—20	5.69±0.36	83.25±8.85	32.68±1.06	47.26±1.98
	20—30	6.45±0.28	79.58±7.36	26.35±2.05	46.25±1.56
	30—40	6.23±0.64	81.23±8.25	28.47±1.87	45.59±2.04
	平均	5.98±0.52ab	82.61±8.42b	30.77±1.64a	46.83±1.97b
枯水期	0—10	5.23±0.69	89.36±7.25	36.69±2.14	49.36±1.54
	10—20	5.36±0.64	87.25±6.23	33.78±1.59	48.54±1.28
	20—30	5.69±0.58	82.69±5.98	29.15±1.68	47.23±2.13
	30—40	6.58±0.72	83.56±9.24	26.35±1.67	45.38±1.85
	平均	5.72±0.66b	85.72±7.18a	31.49±1.77a	47.63±1.70a

表 3 淮河流域湿地土壤养分流失动态特征

不同水期	DP 浓度/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	K <sup>+</sup> 浓度/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	SEP 含量/( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	SEK 含量/( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )
平水期	15.68±2.36c	32.18±2.56c	231±16b	456±59c
丰水期	19.56±1.23b	41.37±1.52b	456±24a	698±93b
枯水期	29.37±1.58a	65.37±2.97a	498±13a	1236±127a

### 2.3 淮河流域湿地水质动态特征

由表 4 可知,淮河流域湿地水质中水温(*T*)、TN、TP、BOD<sub>5</sub> 和 COD<sub>Cr</sub> 浓度呈一致的变化规律,总体表现为丰水期最高,枯水期次之,平水期最低,随水期的变化呈先增加后降低趋势,透明度呈“V”字形变化规律,在平水期最高,丰水期最低,基本表现为平水期>枯水期>丰水期。透明度(*Tr*)变化范围在 37.52~45.61 cm 之间,水温(*T*)变化范围在 6.19~7.21 °C 之间,TN

浓度变化范围在 4.58~6.32 mg/L 之间,TP 浓度变化范围在 0.25~0.28 mg/L 之间,BOD<sub>5</sub> 浓度变化范围在 56.03~73.11 mg/L 之间,COD<sub>Cr</sub> 浓度变化范围在 169.35~183.24 mg/L 之间。与平水期相比,淮河丰水期和枯水期水温分别高出 17.24%和 0.65%,TN 浓度分别高出 37.99%和 14.19%,TP 浓度分别高出 10.71%和 4.00%,BOD<sub>5</sub> 浓度分别高出 30.48%和 23.59%,COD<sub>Cr</sub> 浓度分别高出 8.20%和 2.60%。

表 4 淮河流域湿地水体状况的影响

不同水期	<i>Tr</i> /cm	<i>T</i> /°C	TN 浓度/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	TP 浓度/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	BOD <sub>5</sub> 浓度/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	COD <sub>Cr</sub> 浓度/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )
平水期	45.61±3.41a	6.15±0.42b	4.58±0.32b	0.25±0.05a	56.03±5.91c	169.35±25.63b
丰水期	37.52±2.82c	7.21±1.26a	6.32±0.44a	0.28±0.04a	73.11±7.82a	183.24±35.21a
枯水期	41.34±3.97b	6.19±0.71b	5.23±0.25b	0.26±0.09a	69.25±6.25b	173.76±42.56b
平均值	41.49±3.40	6.52±0.80	5.38±0.34	0.26±0.06	66.13±6.66	124.45±34.47

### 2.4 淮河流域湿地植被多样性与水质指标的关系

将各环境因子与淮河流域湿地植被多样性分别进行偏相关分析,以不同水期水质指标为自变量,湿地植被多样性为应变量。结果(表 5)显示,淮河流域

平水期植被多样性与透明度呈极显著负相关( $P<0.01$ ),与 BOD<sub>5</sub> 浓度和 COD<sub>Cr</sub> 浓度呈极显著正相关( $P<0.01$ ),与 TN 浓度呈显著的正相关关系( $P<0.05$ );丰水期植被多样性与透明度呈极显著负相关

( $P<0.01$ ),与 TN 浓度和 TP 浓度呈极显著正相关( $P<0.01$ ),与  $BOD_5$  浓度呈显著的正相关关系( $P<0.05$ );枯水期植被多样性与透明度呈极显著负相关( $P<0.01$ ),与  $BOD_5$  浓度和  $COD_{Cr}$  浓度呈极显著正相关( $P<0.01$ ),与 TN 浓度呈显著的正相关关系( $P<0.05$ )。

表 5 淮河流域湿地植被多样性与水质指标的关系

影响因子	平水期		丰水期		枯水期	
	偏相关系数	显著性	偏相关系数	显著性	偏相关系数	显著性
水温	0.105	0.268	0.213	0.312	0.114	0.214
透明度	-0.569	0.009**	-0.841	0.000**	-0.685	0.006**
pH	0.234	0.397	-0.156	0.204	-0.241	0.369
TN 浓度	0.423	0.023*	0.689	0.004**	0.456	0.014*
TP 浓度	0.109	0.298	0.587	0.008**	0.387	0.418
$BOD_5$ 浓度	0.693	0.006**	0.421	0.019*	0.756	0.002**
$COD_{Cr}$ 浓度	0.714	0.000**	0.347	0.387	0.699	0.005**

注: \*\*表示相关性在 0.01 水平上显著(双尾), \*表示相关性在 0.05 水平上显著(双尾)。下同。

2.5 淮河流域湿地植被与环境因子的 RDA 冗余分析

冗余分析(RDA)能够客观反映植被与环境因子的相互关系,作为一种直接梯度分析方法,能从统计学的角度来评价一个或一组变量与另一组多变量数据之间的关系,近些年被广泛应用于群落与水环境因子复杂关系的研究<sup>[11]</sup>。淮河流域湿地水质变迁最终体现在植被群落的改变,为了尽可能多地把淮河流域植被多样性与环境因子结合在一起,更好地揭示湿地植被多样性与环境之间的相互关系,将不同水期湿地植被多样性作为物种指标,而用其他水质指标和土壤养分流失等指标来进行和冗余分析。结果(表 6 和图 1)显示,前 2 个排序轴特征值分别为 0.815 和 0.106,第一排序轴可反映不同水期环境因子的梯度变化特征,湿地植被多样性与环境因子 2 个排序轴的相关性均为 1.000,前 2 个排序轴特征值占总特征值的 98.26%,蒙特卡罗检验分析环境因子对植被的影响达到显著性(第一轴  $P<0.01$ ,  $F=7.92$ ;第二轴  $P<0.01$ ,  $F=4.38$ ),能够很好地解释环境因子对植被的影响。RDA 排序图(图 1)显示,淮河流域湿地植被多样性与水质相关指标均呈显著正相关关系( $P<0.01$ ),沿 RDA 第 1 排序轴,淮河流域湿地植被多样性与水质相关指标变化规律相一致,而透明度与植被多样性呈显著的负相关( $P<0.01$ )。

表 6 RDA 排序结果

项目	轴 1	轴 2
特征值	0.815	0.106
变量累积百分比		
物种数据	81.5	10.6
物种—环境关系	81.5	10.6
蒙卡罗检验	499	499
P 值	0.000**	0.000**
F 值	7.92	4.38
物种—环境相关性	1.000	1.000
变量解释	98.26	
所有特征值之和	1.000	
所有典范特征值之和	1.000	

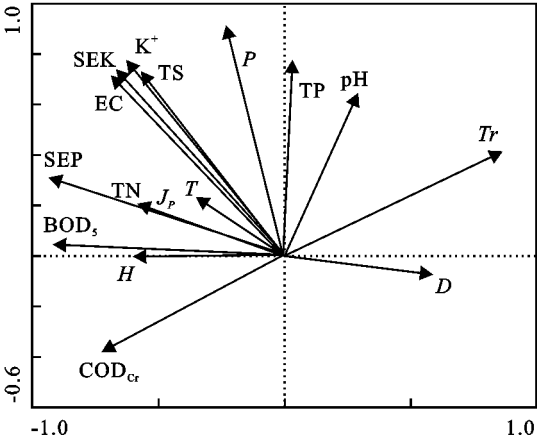


图 1 淮河流域湿地植被多样性与环境因子的 RDA 排序

3 讨论与结论

(1)淮河流域湿地植被资源丰富,目前水质状况和分布特征已成为湿地发展的必要前提。本研究表明,淮河流域湿地植被种类在丰水期达到最高,平水期和枯水期较低,基本表现为丰水期>枯水期>平水期,局部有所波动,在平水期和枯水期水温较低时,湿地植被种类比较少,与前人的研究结果<sup>[16-17]</sup>相一致;丰水期水温较高,在加上水质中 TN 和 TP 浓度较高,导致湿地植被种类数丰富。淮河流域旅游湿地植被 Shannon-Wiener 多样性指数( $H'$ )、Pielou 均匀度指数( $J_p$ )在丰水期较高,平水期和枯水期较低,基本表现为丰水期>枯水期>平水期,局部有所波动。优势度指数呈先降低后增加趋势,基本表现为平水期>枯水期>丰水期。

(2)不同水期土壤 pH、电导率、全盐和总孔隙度在 0—40 cm 剖面上变化趋势基本一致。不同水期土壤 pH 随土层深度的增加而增加,相同土层土壤 pH 基本表现为平水期>丰水期>枯水期;土壤电导率和全盐含量随土层深度的增加呈先降低后增加趋势,不同水期土壤电导率平均值差异均显著( $P<0.05$ ),电导率平均值差异不显著( $P>0.05$ ),相同土层土壤电导率和总孔隙度基本表现为枯水期>丰水期>平水期。

(3)淮河流域湿地土壤 DP、K<sup>+</sup>、SEP 和 SEK 含量均较高,说明淮河流域湿地土壤养分流失较为明显。随着水期的变化,土壤 DP、K<sup>+</sup>、SEP 和 SEK 含量呈增加趋势,在枯水期达到峰值,平水期最低,基本表现为枯水期>丰水期>平水期,土壤 DP、K<sup>+</sup> 和 SEK 含量增加幅度逐渐增加,而土壤 SEP 增加幅度逐渐减小,以 SEK 含量波动较大。从养分流失过程来看,土壤养分含量随着水期逐渐衰减,衰减过程和衰减速率均因土壤养分特性和理化性质不同而表现各异。

(4)淮河流域湿地水质中水温、TN、TP、BOD<sub>5</sub> 和 COD<sub>Cr</sub> 浓度呈一致的变化规律,总体表现为丰水期最高,枯水期次之,平水期最低,随水期的变化呈先增加后降低趋势,透明度呈“V”字形变化规律,在平水期最高,丰水期最低,基本表现为平水期>枯水期>丰水期。从水期的变化规律来看,平水期污染最小,随着水温的增加,各种水生生物和淡水藻类疯狂生长,大部分水域出现水体富营养化,在丰水期污染程度达到最大,导致水质中 TN、TP、BOD<sub>5</sub> 和 COD<sub>Cr</sub> 浓度也达到最大,枯水期藻类和水生生物数目急剧降低,水质状况有所好转。因此,淮河流域水质季节变化与湿地植被多样性变化趋势相一致;同时也说明了淮河流域湿地水质状况可以很好地反映出植被变化情况,这与人对于其他流域的研究结果<sup>[18-19]</sup>一致。

(5)通过偏相关分析可知,不同水期淮河流域湿地植被多样性均与透明度呈极显著的负相关( $P<0.01$ ),表明影响淮河流域湿地植被多样性主要的环境因子是透明度,透明度能够反映出淮河湿地植被多样性及水质状况。平水期植被多样性与 BOD<sub>5</sub> 浓度和 COD<sub>Cr</sub> 浓度呈极显著正相关( $P<0.01$ ),丰水期植被多样性与 TN 浓度和 TP 浓度呈极显著正相关( $P<0.01$ ),枯水期植被多样性与 BOD<sub>5</sub> 浓度和 COD<sub>Cr</sub> 浓度呈极显著正相关( $P<0.01$ )。由此表明,影响平水期和枯水期植被多样性主要因子为 BOD<sub>5</sub> 浓度和 COD<sub>Cr</sub> 浓度,影响丰水期植被多样性主要因子为 TN 浓度和 TP 浓度。以往的研究表明,水质中 N、P 元素长期以来被认为是与湿地植被生长密切相关,其中 P 元素被广泛认为是淡水湿地植被演替的重要影响因,偏相关分析的结果显示淮河流域 TP 并非影响湿地植被分布的主要驱动力,在丰水期 TP 是影响淮河流域湿地植被分布的主要驱动力,而在平水期和枯水期,更多受 BOD<sub>5</sub>、COD<sub>Cr</sub> 等浓度的影响。

(6)冗余分析(RDA)作为一种直接梯度分析方法,不仅维持了良好的景观,而且环境各因子对植被也表现出明显的反馈作。沿 RDA 第 1 排序轴,显示淮河流域湿地植被多样性与水质相关指标均呈显著正相关关系( $P<0.01$ ),沿 RDA 第 1 排序轴,淮河流

域湿地植被多样性与水质相关指标变化规律相一致,而透明度与植被多样性呈显著的负相关( $P<0.01$ ),与偏相关分析的结果相一致,而不同水期植被多样性与环境因子之间的内在联系还需要深入研究。另外,本研究利用 RDA 分析手段初步探讨了不同季节环境因子与湿地植被多样性之间的关系,但研究区域仅仅只是小尺度范围,大尺度下环境因子与湿地植被多样性的关系有待于进一步探讨。

#### 参考文献:

- [1] Engelhardt K A M, Ritchie M E. Effects of macrophyte species richness on wetland ecosystem functioning and services[J]. *Nature*, 2001, 411(6838): 687-689.
- [2] Zorrilla-Miras P, Palomo I, Gómez-Baggethun E, et al. Effects of land-use change on wetland ecosystem services: A case study in the Donana marshes (SW Spain) [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 122: 160-174.
- [3] Feng M, Liu S, Euliss N H, et al. Prototyping an online wetland ecosystem services model using open model sharing standards [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2011, 26(4): 458-468.
- [4] Brinson M M, Eckles S D. U. S. department of agriculture conservation program and practice effects on wetland ecosystem services: A synthesis [J]. *Ecological Applications*, 2011, 21(3): 116-127.
- [5] Wu G L, Ren G H, Wang D, et al. Above- and below-ground response to soil water change in an alpine wetland ecosystem on the Qinghai-Tibetan Plateau, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 476: 120-127.
- [6] Xie X, Zhang M Q, Zhao B, et al. Dependence of coastal wetland ecosystem respiration on temperature and tides: A temporal perspective [J]. *Biogeosciences*, 2014, 11(3): 539-545.
- [7] 邓伟, 白军红. 典型湿地系统格局演变与水生态过程: 以黄淮海地区为例 [M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [8] Na X D, Zang S Y, Zhang N N, et al. Impact of land use and land cover dynamics on Zhalong wetland reserve ecosystem, Heilongjiang province, China [J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2015, 12(2): 445-454.
- [9] 许丽丽, 万云, 盛晟, 等. 淮河流域湿地变化的特征, 热点及其影响因素 [J]. *自然资源学报*, 2013, 28(8): 1383-1394.
- [10] 胡巍巍. 淮河流域中游湿地景观动态变化研究 [J]. *地理空间信息*, 2013, 11(4): 122-124.
- [11] 董旭辉, 羊向东, 刘恩峰, 等. 冗余分析在简化湖泊沉积指标体系中的应用 [J]. *地理研究*, 2015, 26(3): 55-62.
- [12] Laurance S G W, Baider C, Florens F B V, et al. Drivers of wetland disturbance and biodiversity impacts on a tropical oceanic island [J]. *Biological Conservation*, 2012, 149(1): 136-142.

(下转第 140 页)

### 3 结论与讨论

本研究针对东北黑土区地形、气候及耕作方式特征,提出垄沟秸秆覆盖技术,可有效降低顺坡垄作坡耕地的产流产沙量,秸秆覆盖 1 a 后可达半腐解状态,每平方米秸秆可吸纳降水  $14.01 \text{ m}^3$ ;同时,由于秸秆提高了垄沟地表的粗糙度,对垄沟内地表径流起到了缓流挂淤作用,减小了径流流速与挟沙能力,促进了地表径流的入渗,提高了土壤水分含量,覆盖秸秆的农田土壤保水效应随坡度的增加而增大;并且通过对地表径流的拦蓄,起到了减流、减沙的作用,减流率为  $84.8\% \sim 97.9\%$ ,减沙率为  $88.3\% \sim 92.9\%$ 。

坡耕地土壤中 N、P 等养分元素是以离子形式吸附在土壤粘粒表面,或存在于矿质颗粒中,并随着土壤的流失而损失<sup>[11]</sup>。本研究表明,垄沟秸秆覆盖技术的 N、P 养分拦蓄作用主要体现在对速效养分的拦蓄效应强于对全量养分的拦蓄效应。从养分富集率上看,秸秆覆盖处理的流失泥沙中 N、P 养分富集率均小于未覆盖处理,除  $9^\circ$  坡面上 P 素的富集率大于 1 以外,其余覆盖处理的养分富集率均小于 1,说明垄沟秸秆覆盖有利于降低土壤养分的富集作用,与国内相关研究结果<sup>[12-14]</sup>相同。

本研究在充分讨论垄沟秸秆覆盖对顺坡垄作农田水土保持作用的同时,考虑到了垄沟内覆盖秸秆势必会影响田间机械作业,为解决这一问题,本课题组提出了覆盖轮耕的技术措施,即对垄沟内覆盖秸秆后的 2 a 内,不进行耕翻作业,在原垄上种植作物,秸秆经过 2 a 的腐解过程后,基本处于半腐解状态,在第 3 a 对农田进行耕翻,打破原垄进行沟垄交替,将半腐解的秸秆翻压在新垄下,在重新形成的垄沟内进行新一轮的垄沟秸秆覆盖。如此循环覆盖轮耕的方式不仅起到了减流减沙的水土保持效应,也起到秸秆还田增加土壤有机质含量,提升土壤肥力的作用,同时也减少了 N、P 等农业面源污染物的流失。

(上接第 136 页)

- [13] 王洪杰,李宪文,史学正,等. 四川紫色土区小流域土壤养分流失初步研究[J]. 土壤通报,2015,33(6):42-45.
- [14] 高杨,宋付朋,马富亮,等. 模拟降雨条件下 3 种类型土壤氮磷钾养分流失量的比较[J]. 水土保持学报,2011,25(2):15-18.
- [15] 刘红玉,李兆富. 小三江平原湿地水质空间分异与影响分析[J]. 中国环境科学,2015(10):71-75.
- [16] 简敏菲,徐鹏飞,余厚平,等. 乐安河—鄱阳湖湿地植物

参考文献:

- [1] 宋玥,张忠学. 不同耕作措施对黑土坡耕地土壤侵蚀的影响[J]. 水土保持研究,2011,18(2):14-17.
- [2] 唐涛,郝明德,单凤霞. 人工降雨条件下秸秆覆盖减少水土流失的效应研究[J]. 水土保持研究,2008,15(1):9-11,40.
- [3] 刘会青,年吉刚,赵兰坡. 吉林省水土流失遥感调查与分析[J]. 吉林农业大学学报,2008,30(3):328-333.
- [4] 宋维峰,徐新晓,张颖. 坡度和刺槐覆盖对黄土坡面产流产沙影响的模拟降雨研究[J]. 中国水土保持科学,2008,6(2):15-18.
- [5] 谢庭生,何英豪. 湘中紫色土水土流失规律及土壤允许侵蚀量的研究[J]. 水土保持研究,2005,12(1):87-90.
- [6] 冯秀,查轩,黄少燕. 人工模拟上黄岗岩红壤坡面侵蚀过程与特征分析[J]. 中国水土保持科学,2014,12(1):19-23.
- [7] 杨青森,郑粉莉,温磊磊,等. 秸秆覆盖对东北黑土区土壤侵蚀及养分流失的影响[J]. 水土保持通报,2011,31(2):1-5.
- [8] 范成五,罗益,王文华,等. 不同管理措施对黄壤坡耕地径流氮输出的控制效果[J]. 农业环境科学学报,2014,33(10):1948-1955.
- [9] 杨皓宇,赵小蓉,曾祥忠,等. 不同农作制对四川紫色丘陵区地表径流氮、磷流失的影响[J]. 生态环境学报,2009,18(6):2344-2348.
- [10] 叶芝茵,刘宝元,符素华,等. 土壤侵蚀过程中的养分富集率研究[J]. 中国水土保持科学,2009,7(1):124-130.
- [11] 吴新亮,魏玉杰,李朝霞,等. 亚热带地区几种红壤坡面侵蚀泥沙的物质组成特性[J]. 土壤学报,2014,51(6):1223-1233.
- [12] 张亚丽,张兴昌,邵明安,等. 秸秆覆盖对黄土坡面矿质氮素径流流失的影响[J]. 水土保持学报,2004,18(1):85-88.
- [13] 张月霞,杨君林,刘炜,等. 秸秆覆盖条件下不同施氮水平冬小麦氮素吸收及土壤硝态氮残留[J]. 干旱地区农业研究,2009,27(2):189-193.
- [14] Rajan B, Khera K L. Effect of tillage and mode of straw mulch application on soil erosion in the submontaneous tract of Punjab, India [J]. Soil & Tillage Research, 2006,88:107-115.
- [15] 群落分布及其环境影响因子[J]. 环境科学研究,2015,28(3):408-417.
- [17] 张丽丽,殷峻暹,蒋云钟,等. 鄱阳湖自然保护区湿地植被群落与水文情势关系[J]. 水科学进展,2012,23(6):768-775.
- [18] 崔保山,刘兴土. 三江平原挠力河流域湿地生态特征变化研究[J]. 自然资源学报,2001,16(2):107-114.
- [19] 李英华,崔保山,杨志峰. 白洋淀水文特征变化对湿地生态环境的影响[J]. 自然资源学报,2004,19(1):62-68.