

向海洪泛湿地土壤对氮和磷的 滤过截留作用及影响因素分析

翟金良¹ 何岩² 邓伟²

(1 中国科学院资源环境科学与技术局 北京 100864; 2 中国科学院东北地理与农业生态研究所 长春 130012)

摘要 通过野外采集土壤样品,利用自行设计的有机玻璃柱对向海国家级自然保护区内霍林河典型洪泛湿地土壤对配制溶液中的 N 和 P 的滤过截留作用进行了实验模拟研究。结果表明向海洪泛湿地土壤在垂直方向上对 N 和 P 具有很强的滤过截留作用,经过 60cm 厚土层的滤过截留后,配制溶液中的总 N (TN)、总 P (TP)、 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N、 PO_4^{3-} -P 的浓度均减少 90% 以上。对遴选的洪泛土壤对 N 和 P 滤过截留作用的影响因子进行了灰色关联分析,得出了洪泛湿地土壤对 N 和 P 滤过截留作用的影响因子的强弱排序。

关键词 洪泛湿地;土壤;滤过截留作用;灰色关联分析

中图分类号 S153

洪泛湿地是湿地的重要类型之一,由周期性的洪水泛滥形成,分布范围取决于洪水漫溢的范围。洪泛湿地是水陆自然景观的重要组成部分和流域中水陆相互作用的交错带,洪泛区湿地对进入河道生态系统和渗入地下含水层的地表片状集中的污染物可以滤过截留并对某些物质产生阻滞和富集,从而成为河道走廊内、地表水与地下水之间的重要生态缓冲区^[1,2]。国内外一些学者针对湿地对不同污染物的滤过截留作用开展了研究^[3-14]。洪泛湿地滤过截留作用与湿地中水生和陆生植物的生态特征及组织特性、湿地面积及水文状况、湿地微地貌格局、土壤性质等因素密切相关。研究表明洪泛湿地对污染物如 N 和 P 等的滤过截留作用有两个方面,一方面是植物对 N 和 P 等的吸收利用,另一方面是土壤对 N 和 P 等的吸附截留作用,这已经成为共识,但两种作用以哪一种为主存在着不同看法^[15,16]。对湿地滤过截留作用的研究多偏于对植物和微生物对污染物吸附降解的研究,而对植物和微生物生长所依托的土壤对物质的截留和滤过作用则研究很少^[17],湿地土壤是湿地各种理化反应过程发生的基质^[18],探讨洪泛湿地土壤对 N 和 P 等污染物的滤过截留作用具有重要意义。

向海国家级自然保护区区内发育有典型的霍林河潜育化洪泛湿地,被世界自然基金会(WWF)评

为“具有国际意义的 A 级自然保护区”,1992 年向海保护区湿地被列入《国际重要湿地名录》。对于本区洪泛湿地生态环境功能和价值的科学研究积累很少,尤其是对于本区天然洪泛湿地土壤的滤过截留作用的研究尚未见报导。本文尝试在实验室条件下排除洪泛湿地植物的影响而对霍林河洪泛湿地土壤对 N 和 P 在垂直方向上的滤过截留作用进行土柱渗滤试验模拟研究。

1 材料与方法

1.1 样品的采集

经向海国家级自然保护区管理部门批准,2001 年 7 月份在霍林河右岸向海国家级自然保护区内的洪泛湿地采集土壤样品。为了尽可能的使模拟试验用的土柱接近野外实际情况,将自制渗滤用有机玻璃柱带到野外进行土样填充。选择有代表性的洪泛湿地(采样点为 44°55' 21.9" N, 122°9' 7.1" E),挖掘长 2m,宽 1.5m 的土壤剖面,用锋利的剖面刀沿剖面一侧分层小心割取原状土,野外共采集 4 层计 60cm 厚,分别修饰成圆柱状后,按照所采集的由下向上的土层先后嵌入渗滤用有机玻璃柱中带回实验室,装入玻璃柱中的土柱即代表了野外采样点处 0~60cm 厚的土层。渗滤用有机玻璃柱呈圆柱状,内壁直径为 14cm,一侧从底向上每隔 10cm 设计有取

渗滤液的出嘴，滤液出嘴处塞堵上橡胶塞，用穿过橡胶塞的玻璃管套上橡胶软管引到三角瓶中接取侧向渗滤液以备在实验室测用。玻璃柱的下端固定有带孔眼的玻璃隔板，上覆有细网纱，以便将土壤样品托住而利于渗滤液最后经过土层而下渗到柱底端。为了便于实验用渗滤液的下渗，在有机玻璃柱的下端设计有伸出的细长管，可套以橡胶软管外接真空抽气泵以便在渗滤液难以下渗时抽取玻璃柱下部的空气。对应取渗滤液样的出嘴，在有机玻璃柱的对称的另一侧设计有取渗滤液后土壤样的出嘴，为了使取得的土壤样能够更好的代表渗滤液所经过的土层，取土壤样的出嘴分别设计在两个取渗滤液样的出嘴中间，整套试验设计装置如图 1 所示。

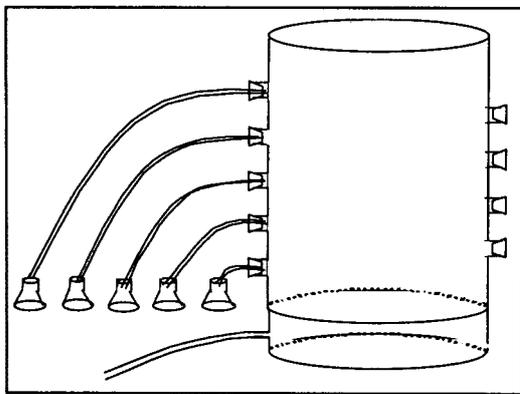


图 1 滤过截留模拟试验装置示意图

Fig. 1 A sketch map of the experimental apparatus equipments

1.2 渗滤溶液的配制

吉林省西部水田施肥后 N、P 浓度分别为 5~100mg/L 和 0.2~10mg/L 左右^[19]，实际测得的 TN 为 71.85mg/L，TP 为 12.23mg/L。考虑到模拟试验中取渗滤液时设计了分层取样，在下层得到的溶液量较少，为了满足实验室分析测试所需要的滤液量必须对溶液进行稀释后才能进行分析测试，因此需要试验用的溶液浓度高于田间 N、P 浓度，设计配制溶液中 TN 和 TP 浓度为田间测值浓度的 5 倍左右，N 和 P 及 NO_3^- -N 与 NH_4^+ -N 浓度间的比值关系参照霍林河河水水样的对应比值关系。霍林河河水与苇田中的灌溉河水水样的实测 NO_3^- -N 浓度与 NH_4^+ -N 浓度之比为 3.77（霍林河主河道水样，采样点经纬度为 44°55' 55.7" N, 122°14' 15" E）和 5.12（芦苇湿地中霍林河洪泛水水样，采样点经纬度 44°55' 21.6" N, 22°9' 52" E）。在实验室内用 $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ 、 KNO_3 溶于蒸馏水中配制渗滤试验

所需用的初始溶液。所得溶液的 NO_3^- -N 浓度测试值为 291.1mg/L， NH_4^+ -N 浓度测试值为 58.94mg/L， NO_3^- -N 浓度与 NH_4^+ -N 浓度比为 4.94 倍，TP 浓度测试值为 64.85mg/L， PO_4^{3-} -P 浓度测试值为 63.98 mg/L，以 NO_3^- -N 与 NH_4^+ -N 之和作为 TN（对可能出现的少量可溶性含 N 物质忽略不计），得到 TN 的浓度为 350.04mg/L。

将配置好的渗滤用初始溶液倒于有机玻璃柱内土层上方，在下渗过程中保持土层上方具有约 15cm 深的溶液，向有机玻璃柱中分多次共加入 3500mL 配制的溶液。对于各出水嘴处侧向渗出的溶液在接到约 100ml 后即进行实验室内的分析测定，做到即采即测，测定方法：TN 采用凯氏定 N 法， NH_4^+ -N 采用钠氏试剂分光光度法， NO_3^- -N 采用酚二磺酸分光光度法，TP 采用钼酸铵分光光度法^[20]； PO_4^{3-} -P 采用磷钼蓝分光光度法^[21]。

2 结果与讨论

2.1 洪泛湿地土壤对 N 和 P 的滤过截留作用

经过土壤各层的渗滤溶液其 TN、 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N、TP 及 PO_4^{3-} -P 的浓度均呈下降趋势，经过每一层土壤层都被滤过截留，浓度值持续减小，说明 N 和 P 被土壤滤过截留，渗滤用溶液浓度的变化见图 2~6，图中滤液 1 表示经过 0~10cm 土壤滤过截留后的渗滤液，依此类推，滤液 6 表示经过 0~60cm 土壤滤过截留后的渗滤液。

在滤液 1~6 全部溶液接完后，重新用三角瓶接滤液 1~6 系列溶液样，对分析测试值（Y）与第一系列对应的分析测试值（X）进行回归相关性分析，见表 1 所示。就两系列的相关性而言，除了 NH_4^+ -N 的稳定性稍差而导致两次系列渗滤液样测试值的相关性较差外，其它测试项目的相关性非常好，在 95% 的置信区间上均达到显著性相关。从图 2~6 可以看出，配置溶液经过 60cm 的土柱后，全 N、全 P、 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N 和 PO_4^{3-} -P 都被截留，其浓度值都减少，被截留率均在 90% 以上。说明洪泛湿地土壤对 N 和 P 的滤过截留在 0~60cm 厚范围内作用非常明显。随着土层深度增加，测试项目浓度值持续被截留减少，随土层深度增加测试项目被截留减少的浓度值占总被截留减少浓度值的累积百分比累积在增加，测试项目浓度在每一土层都被截留，但每一土层对浓度的截留程度不同，见图 7 和图 8 所示。

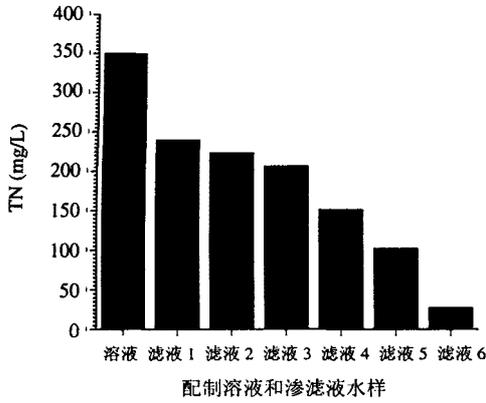


图 2 配制溶液和渗滤液水样的 TN 测试值
Fig. 2 TN in the solution and filtrate

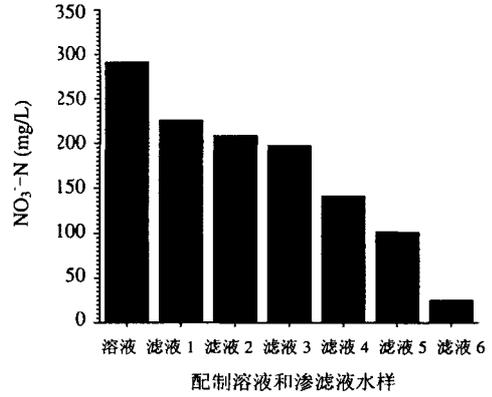


图 3 配制溶液和渗滤液水样的 NO₃⁻-N 测试值
Fig. 3 NO₃⁻-N in the solution and filtrate

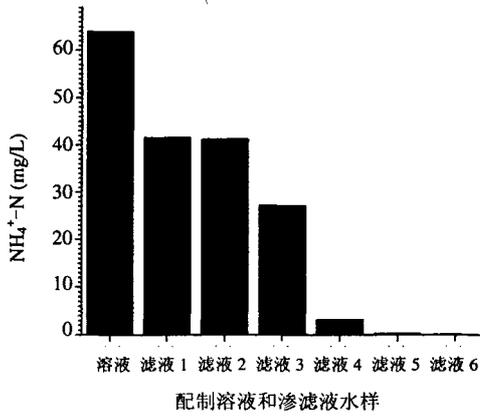


图 4 配制溶液和渗滤液水样的 NH₄⁺-N 测试值
Fig. 4 NH₄⁺-N in the solution and filtrate

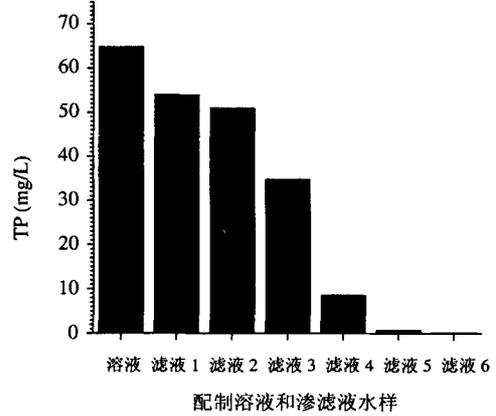


图 5 配制溶液和渗滤液水样的 TP 测试值
Fig. 5 TP in the solution and filtrate

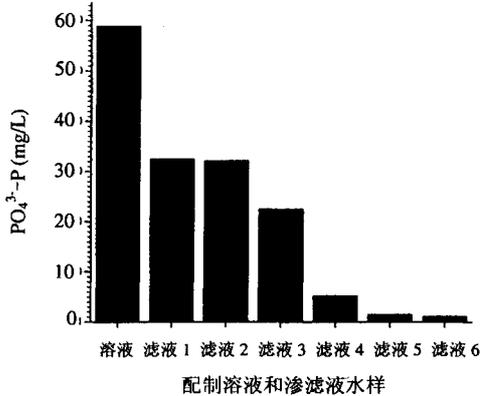


图 6 配制溶液和渗滤液水样的 PO₄³⁻-P 测试值
Fig. 6 PO₄³⁻-P in the solution and filtrate

表 1 两次系列渗滤液样对应测试项目值的相关性
Table 1 Correlation between two series of data of the filtrates

测试项目	回归方程	相关系数 R	置信区间
TN	Y=53.9198+0.6197X	0.9694	95%
NO ₃ -N	Y=56.7361+0.5748X	0.9530	95%
NH ₄ ⁺ -N	Y=6.4920+0.4281X	0.4394	95%
TP	Y=-1.4298+0.8718X	0.9972	95%
PO ₄ ³⁻ -P	Y=-1.4892+0.9207X	0.9940	95%

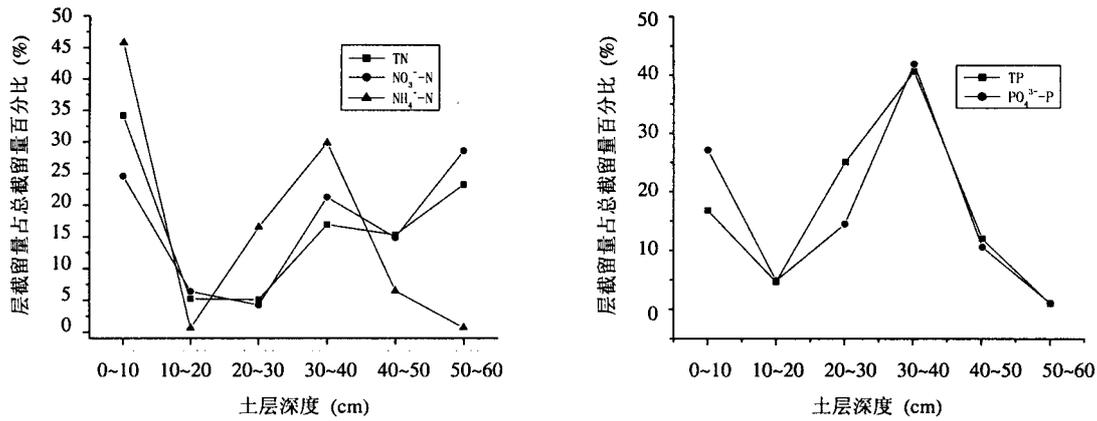


图 7、8 各分析测试项目浓度值在每一洪泛湿地土壤层被截留量占浓度总被截留值的百分比

Fig. 7 and 8 Percentage of the interception of each layer (10 cm each) of the soil against the total interception of N and P, respectively

2.2 洪泛湿地土壤对N和P的滤过截留作用的影响因子分析

洪泛湿地对污染物质的滤过截留作用所受影响因素非常复杂。对物质的截留比率受径流中物质的含量、酸碱度、水中有机质含量、气候及周围土地利用格局等的影响，截留的量也受径流通过洪泛湿地的方向、形式、流速、变化等的影响^[22]。在本论文的试验模拟研究中，如图 8 所示，模拟用的洪泛湿地土柱的各土层对 N 和 P 滤过截留作用程度不同，这与各土壤层的理化性质等不同具有密切关系。先选取对 N 和 P 的滤过截留作用具有影响作用的土壤影响因子，并通过灰色关联分析对影响因子的影响强度进行定量化排序研究。

2.2.1 影响因子确定 选取能够代表土壤理化性质的环境因子作为土壤滤过截留作用的影响因子。土壤的机械组成是重要的土壤物理性质，选取反映机械组成的各土层的砂(0.05~1.00mm)含量(g/kg)、粉砂(0.005~0.05mm)含量(g/kg)、粘土(<0.005mm)含量(g/kg)作为影响因子；pH、电导是土壤重要的基本性质和土壤属性的标志，作为影响因子进行分析；土壤特性与氧化还原条件具有密切关系，通过土壤氧化还原作用的计量指标氧化还原电位值可大体上了解土壤的通气性和还原程度等土壤条件，故将其作为一个影响因子；土壤水分是土壤的重要组成部分，将土壤的水分含量(土壤吸湿水含量)作为一个影响因子；土壤容重是反映土壤孔隙

度、土壤组成等土壤物理特性的指标，将各土层的土壤容重作为影响因子；土壤中有机质对 N 和 P 的吸附与解吸具有重要影响^[23]，如有机质释放出的 H⁺ 可使矿物表面基团质子化而有利于 P 的吸附^[24]，而 NH₄⁺-N 易被有机质和粘土矿物所固定，故此将各土层的有机质含量作为影响因子加以考虑；此外，将测试项目被滤过截留前各测试项目的初始浓度值也分别作为影响因子予以考虑。

2.2.2 灰色关联分析方法简介 灰色关联分析通过数据到数据的映射，几何图形的同构来处理随机变量，根据因素与目标之间的相似程度来判断和识别各因素对目标的影响大小。通过确定灰关联因子集、目标集参考序列和因素集参考序列，对序列数据进行均值化、初值化或标准化等处理，使因子无量纲化且量级相近从而可以进行比较，通过公式求算关联系数和关联度^[25]。在灰关联因子集 X 中，

$$X = \{x_i | i \in N, N = \{0,1,2, \dots, m\}, M \geq 2, \\ x_i = (x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(n)), \\ x_i(k) \in x_i, k \in K, K = \{1,2, \dots, n\}, n \geq 3\}$$

令 $x_0 \in X$ 为目标集参考序列， $x_i \in X$ 为因素集参考序列， $x_0(k)$ 与 $x_i(k)$ 分别为 x_0 与 x_i 在第 k 点的数据，把非负实数 $g(x_0(k), x_i(k))$ 称为 x_i 对 x_0 在 k 点的灰关联系数，其中，

$$g(x_0(k), x_i(k)) = \frac{\min_{i \in N} \min_{k \in K} |x_0(k) - x_i(k)| + z \max_{i \in N} \max_{k \in K} |x_0(k) - x_i(k)|}{|x_0(k) - x_i(k)| + z \max_{i \in N} \max_{k \in K} |x_0(k) - x_i(k)|}, z \in [0,1]$$

灰关联系数即为目标参考数列构成的曲线与因素参考数列构成的曲线在第 k 点的关联系数；令灰关联系数 $g(x_0(k), x_i(k))$ 的平均值 $g(x_0, x_i)$ 为灰关联度，即：

$$g(x_0, x_i) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n g(x_0(k), x_i(k))$$

式中， $|x_0(k) - x_i(k)|$ 是第 k 点目标层次 x_0 与因素层次 x_i 的差的绝对值，是关于距离的测度，而

$\min_{i \in N} \min_{k \in K} |x_0(k) - x_i(k)|$ 与 $\max_{i \in N} \max_{k \in K} |x_0(k) - x_i(k)|$ 分别为目标层次与因素层次差的绝对值的最小值与最大值， z 为常数，称为分辨系数，介于 0 和 1 之间，取值越小，分辨率越高。

由灰关联度按其大小顺序构成的数列称为灰关联序，如果对于 x_0 的影响 x_i 强于 x_j ，在 X 上对于 x_0 的灰关联序模型记为：ORD $(X, x_0) = g(x_0, x_i) >$

$g(x_0, x_j) > \dots > g(x_0, x_k)$ ，以此来表示对事物有影响的因子间的影响程度强弱排序。

2.2.3 影响因子的强弱排序 在本例中，以实验中物质每层截留量占总截留量的百分比为目标集，取因素集为各土柱层的物理和化学环境因子参数，具体包括：S1 砂(0.05~1.00mm)含量(g/kg)、S2 粉砂(0.005~0.05mm)含量(g/kg)、S3 粘土(<0.005mm)含量(g/kg)、S4 pH、S5 电导、S6Eh，S7 土壤含水量、S8 土壤容重、S9 有机质含量和 S10 截留前土壤中物质含量(对 TN、NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 取 S10 为土壤各层中 TN 含量，对 TP 和 PO₄³⁻-P 取 S10 为土壤中 TP 含量)。由于原始数据中同一数列的各性状之间数值相差较大且单位不一致，对原始数据进行均值化以消除量纲量级的影响。对均值化后的数据按照公式求取灰关联系数和灰关联度，排出灰色关联序，计算结果见表 2。

表 2 泛湿地土壤对各测试项目的滤过截留作用的影响因子灰关联排序

Table 2 Gray order of influencing factors of flooding wetland soils in intercepting the tested items

滤过截留对象	洪泛湿地土壤相关影响因子的关联程度排序
TN	S3 粘土>S10TN>S9 有机质>S7 含水量>S4pH>S6Eh>S5 电导>S8 容重>S2 粉砂>S1 砂
NO ₃ ⁻ -N	S3 粘土>S10TN>S7 含水量>S9 有机质>S4pH>S5 电导>S6Eh>S2 粉砂>S8 容重>S1 砂
NH ₄ ⁺ -N	S9 有机质>S3 粘土>S10TN>S6Eh>S4pH>S5 电导>S7 含水量>S8 容重>S2 粉砂>S1 砂
TP	S3 粘土>S9 有机质>S4pH>S7 含水量>S10TN>S6Eh>S8 容重>S5 电导>S2 粉砂>S1 砂
PO ₄ ³⁻ -P	S3 粘土>S9 有机质>S4pH>S7 含水量>S10TN>S6Eh>S5 电导>S2 粉砂>S8 容重>S1 砂

从计算的关联序结果可以看出，对于 N 素的滤过截留起主要影响作用的土壤因子是粘土含量、有机质含量和 TN 含量，对于 P 素的滤过截留起主要影响作用的土壤因子是粘土含量、有机质含量、pH 和含水量，对于 N 素和 P 素的滤过截留都起重要的影响作用的土壤因子是粘土含量和有机质含量，而土壤电导、Eh、土壤容重、粉砂含量和砂含量对于 N 素和 P 的截留均影响相对较弱。

参考文献

1 邓伟, 宋新山, 翟金良. 洪泛区湿地保护与水资源可持续利用. 科技导报, 2000, (3): 58~60
 2 翟金良, 何岩, 邓伟. 洪泛作用与洪泛区可持续发展. 中国人口资源与环境, 2000, (10): 46~48
 3 杨永兴, 刘兴士, 韩顺正等. 三江平原沼泽区“稻 - 苇 - 鱼”复合生态系统生态效益研究. 地理科学, 1993, 13(1):

41~48
 4 尹澄清, 兰智文, 晏维金. 白洋淀水陆交错带对陆源营养物质截留作用的初步研究. 应用生态学报, 1995, (6): 76~80
 5 曲向荣, 贾宏宇, 张海荣, 李秀珍等. 辽东湾芦苇湿地对陆源营养物质净化作用的初步研究. 应用生态学报, 2000, 11(2): 270~272
 6 丁疆华, 舒强. 人工湿地在处理污水中的应用. 农业环境保护, 2000, 19 (5): 320~332
 7 Lowrance RR, Todd RL, Fail Jr, Hendrickson OJr, Leonard R and Asmussen L. Riparian forests as nutrient filters in agricultural watersheds. Bioscience, 1984, (34): 374~377
 8 Haycock NE and Burt TP. Role of floodplain sediments in reducing the nitrate concentration of subsurface runoff: a case study in the Cotswolds. UK, Hydrol. Process, 1993, 7: 287~295

- 9 Brunet RC, Pinay G, Gazelle F, Roques L. Role of the floodplain and riparian zone in suspended matter and nitrogen retention in the Adour River South-West France. *Regulated Rivers: Research and Management*, 1994, 8: 55~63
- 10 Gilliam JW. Riparian wetlands and water quality. *Environ. Qual.*, 1994, 23: 896~900
- 11 Brunet RC, Astin KB. Variation in mineral nitrogen levels: the river Adour. *Hydrobiologia*, 1996, 335: 159~170
- 12 Hill AR. Nitrate removal in stream riparian zones. *J. Environ. Qual.*, 1996, 25: 743~755
- 13 Gilliam JW, Parsons JE and Mikkelsen RL. Nitrogen dynamics and buffer zones. In: Haycock NE, Burt TP, Goulding KW and Pinay G. eds. *Buffer Zones: Their processes and potential in water protection*. *Quest Environmental*, Harpenden, 1997, 54~61
- 14 Tockner K, Pennetzdorfer D, Reiner N, Schiemer F, Ward JF. Hydrological connectivity and the exchange of organic matter and nutrients in a dynamic river-floodplain system. *Freshwater Biology*, 1999, 41: 521~535
- 15 Gilliam JW, Parsons JE and Mikkelsen RL. Nitrogen dynamics and buffer zones. In: Haycock, NE, Burt TP, Goulding KWT and Pinay G. eds. *Buffer Zones: Their processes and potential in water protection*, *Quest Environmental*, Harpenden, 1997, 54~61
- 16 Reddy KR and Rao PSC. Nitrogen and phosphorus fluxes from a flooded organic soil. *Soil Sci.*, 1983, 136: 300~307
- 17 陈博谦, 王星, 尹澄清. 湿地土壤因素对污水处理作用的模拟研究. *城市环境与城市生态*, 1999, 12 (1): 19~21
- 18 王宪礼. 我国自然湿地的基本特点. *生态学杂志*, 1997, 16 (4): 64~67
- 19 闫百兴. 吉林省西部非点源污染研究. 中国科学院长春地理研究所, 博士论文, 2001
- 20 谢贤群, 王立军主编. *水环境要素观测与分析*. 北京: 中国标准出版社, 1998, 58, 104~108, 271~278
- 21 国家技术监督局. *饮用天然矿泉水检验方法*. 北京: 中国标准出版社, 1996, 134~135
- 22 尹澄清. 内陆水-陆地交错带的生态功能及其保护与开发前景. *生态学报*, 1995, 15 (3): 331~335
- 23 Sibanda HM and Young SD. Competitive adsorption of humus acids and phosphate on goethite, gibbsite and two tropical soils. *J. Soil Sci.*, 1986, 37: 197~204
- 24 Ryden JC, McLaughlin JR and Syers JK. Mechanisms of phosphate adsorption by soils and hydrous ferric oxide gel. *J. Soil Sci.*, 1977, 28: 72~90
- 25 邓聚龙. *灰色控制系统(修订版)*. 武汉: 华中理工大学出版社, 1993, 309~320

N AND P INTERCEPTION FUNCTIONS OF FLOODING WETLAND SOIL IN XIANGHAI AND THEIR INFLUENCING FACTORS

Zhai Jinliang¹ He Yan² Deng Wei²

(1 *Bureau of Science and Technology for Resources and Environment, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100864;*

2 *Northeast Institute of Geography and Agricultural Ecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130012*)

Abstract Through soil samples collected from the field and placed in a polymethyl methacrylate cylinder, a N and P interception by the wetland soil in the Huolin River in Xinghai were simulated and analyzed. Results show that after passing through a 60cm thick layer of soils, contents of TN, TP, NO₃⁻-N, NH₄⁺-N and PO₄³⁻-P of the prepared solution decreased by over 90%. Grey relationship was analyzed for N and P interception function of each factor in the flooding wetland soils. The sequence of the factors in were determined.

Key words Flooding wetland, Soils, Interception functions, Gray relationship analysis