

植物根孔在土壤生态系统中的功能

王大力, 尹澄清

(中国科学院生态环境研究中心 环境水化学国家重点实验室, 北京 100085)

摘要: 综合论述了植物根孔的概念, 在土壤中的形成、分布以及生态功能。指出植物根孔是土壤大孔隙研究中的重要部分, 是一个由植物根系、土壤、土壤微生物、水、空气等组成的“多介质界面”, 众多的土壤生物过程在此发生, 它在土壤水分、溶质传输以及环境污染物的迁移和转化等过程中具有重要意义。特别是在湿地生态系统中, 发达的地下根孔系统为利用人工湿地系统净化污水、处理污泥等工程提供良好的污染物吸附转化界面以及“微生物消化池”。由于其界定的困难和研究方法的限制使得植物根孔的研究相对较少。深入研究植物根孔在土壤中的形成和功能对拓展和完善土壤大孔隙以及优先水流的研究具有深远的意义, 同时还探讨了植物根孔方面可能的优先研究领域。

关键词: 植物根孔; 土壤; 功能; 综述

Functions of root channels in the soil system

WANG Da-Li, YIN Cheng-Qing (SKLEAC, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: The structure, distribution and functions of root channels in the soil system were reviewed. Root channel is one important component of macropores in the soil system. It is a multimedia-interface, which involved with plant root, soil, microbe, water and air. It plays an important role in soil preferential flow, solute transportation, pollutant absorption and transform. In natural and constructed wetlands, the developed root channel system in the soil constructed a pollutant transport channel, absorption interface, and micro-digestion pool, It can improve the efficiency of these sewage treatment projects. Unfortunately, root channels were not well researched because of the difficulties of methodology and define.

Key words: root channel; soil; function; review

文章编号: 1000-0933(2000)05-0869-06 中图分类号: Q948.1 文献标识码: A

土壤大孔隙是指土壤中有一定孔径和连续性的孔隙, 其间可以形成高速水流。大孔隙一般分为生物性和非生物性孔隙, 细分为以下几类^[1]:

- (1) 土壤的自然孔隙主要是由于土壤的侵蚀和亚表面流造成的;
- (2) 土壤裂隙主要由于土壤干化收缩、冻溶以及母岩的化学风化造成的;
- (3) 土壤动物活动形成的孔隙是由土壤动物的活动形成的孔隙, 大小在 1~50mm 之间, 主要集中于土壤表层, 诸如虫洞、蚁洞等;
- (4) 植物根孔是指由植物根系或地下根茎(包括活根和死根)在土壤中形成的管状大孔隙, 土壤中根孔的多少与植物的种类和生长情况有关, 其在土壤中的溶液优先传输(Preferential flow)作用是十分重要的。

土壤大孔隙在土壤优先水流、溶质运输、环境污染物迁移等方面具有重要的作用, 其中在自然状况下的土壤或免耕的农田, 生物性孔隙的作用更为明显。从目前国际上的研究看, 虽然土壤大孔隙的概念提出较早, 但是针对不同类型土壤孔隙中优先水流和溶质运输的研究相对较少, 其原因是由于土壤大孔隙的结

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(39970152, 59978051)

收稿日期: 2000-01-14; 修订日期: 2000-05-22

作者简介: 王大力(1966—), 男, 山东人, 硕士, 副研究员。主要从事植物化感作用, 全球变化, 植物根孔的功能研究。

构复杂,难以很好地界定各类孔隙。另外频繁的人为干扰,破坏了土壤大孔隙系统,造成大孔隙系统变化的不规律性也是土壤大孔隙研究的困难所在。植物根孔是土壤大孔隙的重要类型,在土壤的溶质运输中具有重要作用。由于以往的研究经常是将其同其他类型的土壤大孔隙同时研究,忽略了植物根孔的特点,同时由于植物根孔界定的困难使得植物根孔的研究一直未得到科学界的充分认识和深入研究。

1 植物根孔的概念

植物根孔是土壤大孔隙的一个重要类型,是指由植物根系(包括植物的地下根状茎)在生长过程中以及根系死亡后土壤中形成的孔道。传统的植物根孔主要是指植物根系死亡腐败后在土壤中形成的孔道,而活体植物根系在生长过程中与土壤之间形成的孔隙是植物根孔概念的进一步拓展(图 1)。Hursh^[2]指出在森林土壤中每年植物根系的腐烂都会形成较多的连续性开放孔道,其间具有快速的水流,这就是植物根孔。植物根孔在森林土壤中大约可以占到土壤孔隙的 35%,并随深度增加而下降。植物种类和环境都会影响到根孔的形成^[3]。

植物根孔在土壤中可以分为水平型和垂直型根孔,在不同生境下的土壤中两种类型的根孔组成会有所不同。在旱地上,由于土壤水分的影响,根系垂直生长,会形成以垂直根孔为主的根孔系统;而在湿地系统中,水分的影响较少,植物侧根或次生根相对丰富,某些植物还有发达的地下根茎。例如在白洋淀水陆交错带湿地的调查发现,由于芦苇地下根茎的存在,在土壤中形成了发达的水平型根孔系统,与垂直型根孔相连接构成了庞大的地下根孔导流系统。

植物根孔还可以说是植物和土壤之间的“多介质界面”,由水、气、土壤、微生物和植物根系组成。对于活体根系生长形成的根孔,由于根系的吸收、分泌以及根际微生物的活动等,形成了一个根系吸收-分泌-微生物代谢-空气传输-溶质流动的持续界面。根系分泌为植物根孔周围的“微生物膜”提供持续的碳源,而根系的吸收和微生物膜的代谢活动对土壤溶质流动中的转化具有重要意义。由根系腐烂形成的根孔,由于其在土壤中形成广泛连续的大孔径孔隙,使得土壤水分和溶质形成优先水流,在土壤导流中具有重要意义;且孔隙中丰富的根系分解物,加之水分、溶质和空气的运输,为微生物提供了良好的生长界面和条件,形成所谓“微生物膜”,所以此类根孔在土壤溶质的迁移和转化中的作用也是相当重要的。Vinther 等^[4]认为由于溶质在土壤大孔隙中的运输,为大孔隙周围的土壤微生物提供了充足的营养和生长所需的各种底物,所以大孔隙周围的微生物具有较高的生物量和代谢活性,例如反硝化作用等。

由此可以看出,植物根孔作为土壤大孔隙的一个重要组成,在土壤优先水流和溶质运移中具有重要的作用,深入研究其形成、功能以及界面特点对理解土壤溶质传输是非常有意义的。

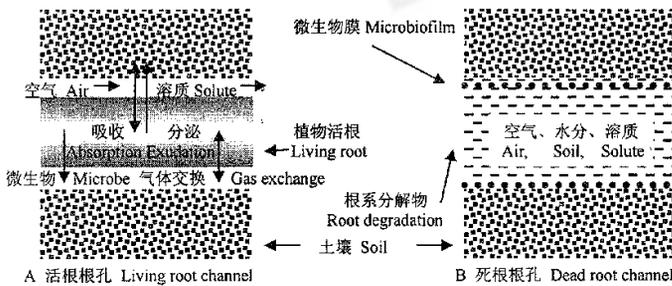


图 1 植物根孔类型

Fig.1 Types of root channel

2 植物根孔的研究方法

由于目前国际上针对植物根孔的研究相对较少^[5,6],成熟的方法并不是很多。总体上研究方法应包括根孔的结构和分布数据、优先水流以及土壤溶质传输等方面的技术方法,同时针对植物根孔的研究很多可以借鉴土壤大孔隙研究的经验和方法。

Gaiser^[7]运用传统的土壤剖面清查方法研究了硬木根孔在野外土壤中的纵向分布,另外根据根孔内部松软的特点,用软棒刺探垂直根孔的水平分布,粗略的估计发现每英亩上垂直根孔至少超过4000个。

研究土壤中的大孔隙必须注意区分两类空隙,即具有优先水流的有效大孔隙和没有优先水流的无效孔隙。由于有效大孔隙中优先水流的携带作用,在大孔隙四周会发现重新沉积的粘土颗粒和细淤泥,这些再沉积的粘土和淤泥断层可以为人们提供一些关于有效大孔隙的信息^[1]。另外大孔隙周围的有色斑点也可以说明大孔隙中快速水流的存在,例如 Germann^[8]发现壤土 Bt 层根孔在优先水流的传导过程中,由于渗透作用使周围的土壤形成厌氧环境,进而使铁、锰氧化物还原淋洗并在根孔周围留下一个白色区域,流动一定距离后进入好氧环境而被氧化,在根孔表面形成红色的斑点。由此,这些形态学上的特点可以帮助人们在土壤中跟踪研究植物根孔的分布和结构。

对植物根孔在土壤中的分布和结构研究是根孔研究中最为基础的部分,发光染料是一种较好的根孔示踪物质,Reynolds^[9]研究比较了12种荧光染料在实验室酸性土壤中的荧光持久性以及对于干湿环境的反应,发现一种吡喃类荧光染料(Pyranine conc.)是十分理想的、可用作研究土壤水分渗透的染料。Kissel等^[10]运用荧光染料和紫外成像法研究了土壤剖面上的有效土壤大孔隙。Ehlers^[11]利用染色法研究了土壤中的虫洞系统。Sollins和Radulovich^[12]运用罗丹明染料研究了植物根孔中的优先水流和溶质运移。Robertson和Campbell^[13]建立了一套间接廉价的分析方法,他们利用混有荧光染料(Oracet yellow 8GF)的树脂(Fastglas)固定土壤样品,然后切片拍照并转换成数字化图象,利用图象的灰度阈值划分土壤孔隙和土壤颗粒物,最后用相应软件分析土壤孔隙组成。

计算机辅助断层扫描术(CT)是现代无损探测新技术,已广泛应用于医学等领域。CT技术在土壤结构研究中也具有较为重要的应用,可以在植物根孔的结构研究中有借鉴,例如Capowicz等人^[14]利用CT研究了土壤中虫孔系统,并重建了其3D图象,他们首先利用特制的采样器获得完整的土壤样品,然后每隔3mm利用医用CAT扫描获得一系列2D图象,利用NIH Image1.60, Codewarrior 8以及Rotator 3.0进行图象处理,获得重建的虫孔3D图象。Pierrert等人^[15]利用CT技术研究了槭树(*Acer pseudoplatanus* L.)根系在土壤中的空间分布和结构,他们首先将树木周围不同位置的原位土样用环氧树脂渗透稳定,然后利用CT间隔2mm分析稳定后的土柱(200mm×500mm),最后利用图象分析软件重建3D图象并进行根系长度分布、密度、角度以及空间分布。CT技术在土壤大孔隙方面的应用具有精确、非损伤以及土壤样品制备简洁等优点,但是适用于原位土壤大孔隙CT技术研究和应用却未见研究报道。

植物根孔的室内模拟研究也是一个重要方面,Li等^[5]和Gish^[6]等在室内采用种植作物,并使其腐烂的方法产生植物根孔,并研究作物根孔中的优先流问题,但是这种方法需要的实验周期较长。利用人工方法获得的模拟根孔^[5,6]也是一种研究方法,但是模拟根孔的结构同实际有较大的差异。

3 土壤大孔隙的物质流和植物根孔的功能

植物根孔作为土壤大孔隙的一个重要类型,具有多种重要的功能,例如:土壤优先水流、溶质流、氧气流以及生物流等。

Gaiser^[7]研究了白橡树(*Quercus alba* L.)、山胡桃(*Carya* spp.)等树木的根孔,发现由山胡桃的主根形成的垂直根孔将次生根或侧根根孔连接在一起,根孔中主要是大量松散的根系腐烂有机物、相应土层的土壤成分,它们在土壤中形成了纵向和横向的水分传输网络,土壤中大量的自由水分由此传输。Reynolds^[9]在英国的研究也发现在靠近树木的区域,水分优先沿植物根孔运输。Shirmohammadi等^[16]发现2年生苇状羊茅(*Festuca arundinacea* Schreb.)的根孔可以使细砂质土的饱和导水率提高5倍。Ellsworth等^[17]研究了植物根孔在土壤 Cl^- 、 NO_3^- 和硼等运输中的作用,发现在未受扰动的土壤中,由于土壤中植物根孔的存在使得 Cl^- 、 NO_3^- 和硼的运输深度要大于对照土壤。Gish等^[18]研究了植物根系对地下水质量的影响,运用亮蓝研究土壤中优先水流的途径时,发现植物死根根孔在免耕农田中不仅对优先水流影响较大,而且根孔中有有机物含量、微生物种群和氧气含量都高于没有根孔的土壤,加强了农药在土壤传输中的降解。Vinter等^[4]研究发现在白洋淀地区土壤样品中 NO_3^- -N和可溶性碳的含量高于没有大孔隙的土壤。据作者在白洋淀地区的调查,也发现虽然白洋淀湿地土质为粘质,但是由于芦苇根孔的存在使得土壤导水率极大地提高^[19]。

其他一些研究也证明植物根孔是土壤水分的重要通道^[1,3]。

氧气是植物根系和土壤微生物进行正常生理代谢的因素之一。有些研究认为氧气在土壤中的传输主要是以气体扩散形式进行传输,而针对土壤大孔隙对氧气在土壤中传输的影响研究进行较少。Dziejowski 等^[20]模拟研究了土壤中的氧气优先运输问题。实验采用了均匀土柱和人工大孔隙土柱两组处理,人工大孔隙处理的空隙度比均匀土柱高 0.3%,两组处理均保持 3cm/d 的人工降水量,结果发现在 30cm 以上两组处理氧气浓度相同,原因是 30cm 以上的土壤中氧气的运输主要是以气体扩散的形式进行;而在 30~90cm 土壤中氧气浓度则是人工大孔隙处理高于均匀土柱处理约 4%。因此他们认为氧气在人工大孔隙处理的传输中不仅是依靠扩散,而且存在氧气的优先运输问题。植物根孔是否存在相同的作用还不很清楚,由于根孔的“多介质界面”的特点,特别是某些水生植物根系具有发达的通气组织,可以将氧气输送到根区^[21],因此根孔中的气体交换相对较强,氧气等在根孔中优先运输和交换可能会更加复杂和重要。

目前污泥处理的一种主要方法是填埋或回田,这两种污泥处置的方法会引起污泥中环境污染物和微生物对土壤和地下水的污染,因此微生物在土壤中的迁移过程也引起了科学家们的重视。有关污染物和微生物在土壤中的迁移已有研究;Smith 等^[22]比较了抗连霉素大肠杆菌 K12 菌株和 Cl^- 示踪剂在不同土壤中的传输,认为微生物在土壤中的快速运动是由于土壤中存在大孔隙。Abu-Ashour 等^[23]的研究进一步肯定了土壤大孔隙在微生物运动中的重要作用,他们发现通过湿润且具有大孔隙土柱的大肠杆菌 NAR 数目要明显高于干燥大孔隙土柱,而在无大孔隙土柱处理中大肠杆菌 NAR 没有移动。Vinther 等^[4]的研究发现在森林土壤和农田土壤中,含有大孔隙的土壤中细菌数目要高于没有大孔隙的土壤样品,这种现象可能是由于大孔隙溶质流为大孔隙壁上的微生物膜提供了充足的养分,并且大孔隙也促进了土壤微生物在土壤中的运输。所有这些研究都说明在土壤中存在微生物优先流。

植物根孔不仅在土壤优先水流、溶质传输以及环境污染物质迁移等方面具有重要的作用,而且植物根孔还可以看作植物根系同土壤之间的一个重要“界面”,在根际微生态系统中扮演着重要的角色。植物的根系分泌物和根系分解物通过这个界面进入土壤,影响根际微生态系统中的土壤微生物、根孔微生物膜以及周边植物的生长发育,而垂直根孔中的溶质流及水平毛细根孔的稳定水分又为植物提供了重要养分和水分。可以说土壤中众多的生物过程都会在根孔的界面上发生,阐明根孔界面中的生物过程对真正了解根孔的功能具有重要的意义。

利用湿地处理污水和污泥的生态工程是目前国际上一个较新的课题,也取得了一些成果,但是其具体运行机理以及如何提高人工湿地的处理效率(自然富氧、有机物消化、污泥脱水)和延长运行寿命等问题还有待解决。植物根孔在这类生态工程中同样也具有重要作用,因为根孔不仅可以提供通畅的水流渠道,为有用微生物提供大面积的生物膜附着物,而且还可以为土壤微生物提供氧气等,使得污水中的有机污染物得到不同程度的消化和降解。最新的研究表明,利用根孔导水特性可以使污泥脱水,从而使污泥浓缩、脱水和干化在湿地系统中完成。根孔导水还为水中营养物质被土壤吸附创造了条件。尹澄清等^[24,25]发现,在白洋淀含有高浓度氮磷的府河水在通过水陆交错带芦苇根区土壤后,氮磷浓度有了很大的下降,另外根孔的不断更新将使湿地系统保持很高的活力。

根孔的存在除了上述在土壤系统中的作用和功能,还具有其他一些生态学和环境意义。例如根孔的存在也会在一定程度上影响江河湖泊防洪堤岸的安全,其作用可以分为两个方面:①具有合理根孔结构的堤岸在退洪时能够很快地将水由根孔系统导流泻出,保障防洪堤岸的稳固;②如果堤岸根孔结构不合理,诸如与鼠洞、蚁穴相连,就有可能造成堤岸的崩溃。另外在水土保持和防护林工程中也具有其独特的作用。合理的防护林下植被结构不仅可以提高植物对降雨水量的截流,而且会形成良好的地下根孔导流系统,大量减少地表径流的产生,防止水土流失。

4 植物根孔优先水流的模型研究

土壤中由于植物根孔等土壤大孔隙的存在,使得土壤的各向异性加强,所以很多以前用于研究土壤溶质传输的[质量数据](#)定律等在根孔优先水流的研究中不再适用。Li^[9]等研究了人工模拟植物根孔中 N

模型 MIM、随机模型 SM) 比较了 NO_3^- 在土壤-植物根孔系统中的传输。研究发现在腐烂的植物根孔中存在明显的 NO_3^- 优先传输。虽然 3 种模型都不适于预测 NO_3^- 在植物根孔中的优先传输,但是同 CDE 和 SM 两种模型相比,MIM 模型给出了较好的穿透曲线描述。Gish 和 Jury^[26]进行了两年的关于植物根系和植物根孔对溶质传输的影响研究。研究利用种植小麦产生作物根孔,实验分种植作物前、种植作物和种植作物后 3 个处理,采用 MIM 溶质传输模型研究 Cl^- 的穿透曲线。研究发现种植作物后处理的溶质传播程度最高,这主要是由于小麦根系腐烂后形成植物根孔的作用;另外在种植作物处理中的传播程度较种植作物前处理低,作者认为是由于根系在土壤阻止了某些较大孔隙中的溶质传导,造成土壤中静态水分的增加,使得土壤中的孔隙系统相对均匀,这同早期的研究是相对立的。

5 植物根孔的研究展望

可以看出根孔研究的意义是多方面的,但是目前国际上有关植物根孔形成、分布规律、功能以及其中优先水流、溶质运移、动态变化等是十分缺乏的^[5,6]。我国在这方面研究相对更加缺乏^[27,28],因此深入开展植物根孔在土壤生态系统中的结构、动态和功能研究显得十分必要。以下可为优先研究领域:

(1) 植物根孔在土壤系统中的结构和时间空间分布 植物根孔结构和空间分布描述是研究植物根孔在土壤系统中功能的基础。同时由于植物的生长,会引起植物活根根孔和死根根孔在土壤不同深度中组成的变化,进而影响根孔功能上的差别,所以不同生长季节和年际间的差别也具有重要意义。

(2) 植物根孔在土壤系统的导水和通气功能研究 植物根孔在土壤系统可以形成物质传输的“高速公路”,同时也是土壤根际区氧气输入和甲烷排放的重要通道,所以系统研究根孔在不同距离、深度上的导水率和通气作用以及不同径级根孔在导水、持水功能以及通气上的差异有其特别的意义。

(3) 植物根孔在水陆交错带环境污染物传输和净化中的作用 植物根孔在具有导水通气功能的同时,由于植物根系分泌物的产生以及根系腐烂等为根际微生物提供了丰富的有机物,使根孔周围微生物活动旺盛;尤其是许多高等水生植物根系具有传输氧气的功能,形成了环境有机污染物的“天然消化池”,所以研究环境污染物在植物根孔中的迁移和降解过程对完善污水污泥的湿地生态处理工程将有很大的帮助。

(4) 湿地植物根孔的结构和功能研究 湿地是目前国际上一个新的研究热点,湿地植物的根孔可以说是湿地生态系统的一个重要组成部分,是湿地生态系统中物质传输不为人见的“高速公路”,系统中部分水分和养分的变化会很快地通过根孔系统影响到系统的其他部分。由于目前湿地受人类耕作活动影响较少,根孔系统相对完整发达,是非常理想的土壤大孔隙的研究场所;另外由于植物根孔形成、分布同动物孔隙以及土壤其他类型大孔隙相比更为规律,所以选择湿地生态系统中的根孔进行其形成、分布以及功能等研究将为土壤大孔隙研究提供详实的基础理论,并促进土壤大孔隙研究发展。

参考文献

- [1] Beven K and Germann P. Macropore and water flow in soils. *Water Resource Research*, 1982, **18**(5):1311~1325.
- [2] Husrsh H. Soil profile characteristics pertinent to hydrologic study in the Southern Appalachian as attalachians. *Soil Science Society Proceedings*, 1941, **6**: 414~422.
- [3] Aubertin G M. Nature and extent of macropores in forest soils and their influence on subsurface water movement. *For. Serv. Res. Pap. NE(U.S.)*1971, 192PS, 33.
- [4] Vinther F P, Eiland A M, et al. Microbial biomass and numbers of denitrifiers related to macropore channels in agricultural and forest soils. *Soil Biology & Biochemistry*, 1999, **31**:603~611.
- [5] Li Y and Ghodral M. Preferential transport of nitrate through soil columns containing root channels. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1994, **58**:653~659.
- [6] Gish T J and Jury W A. Effect of plant roots and root channels on solute transport. *Trans. ASAE*, 1983, **26**SW: 440~451.
- [7] Gaiser R N. Root channels and roots in forest soils. *Soil Science Society Proceedings*, 1952, **16**(1): 62~65.
- [8] Germa 万方数据 nungen über den Boden Wasserhaushalt in Einzugsgebiet Rietholzbach. Mitt. Versuchant. Wasserbau Hydrol. Glaziologie ETH Zurich, 1981, **51**, 133.

- [9] Reynolds E R C. The percolation of rainwater through soil demonstrated by fluorescent dyes. *Journal of Soil Science*, 1966, **17**(1): 127~132.
- [10] Kissel D E, Ritchie J T, and Burnett E. Chloride movement in undisturbed swelling clay soil. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 1973, **37**: 21~24.
- [11] Ehlers W. Observations on earthworm channels and infiltration on tilled and untilled loess soil. *Soil Sci.*, 1975, **119**(2): 242~249.
- [12] Sollins P and Radulovich R. Effects of soil physical structure on solute transport in a weathered tropical soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1988, **52**: 1168~1173
- [13] Robertson E A G and Campbell D J. Simple, low-cost image analysis of soil pore structure. *J. Agric. Engng. Res.*, 1997, **68**: 291~296.
- [14] Capowiez Y, Pierret A, Daniel O, *et al.* 3D skeleton reconstruction of natural earthworm burrow systems using CAT scan images of soil cores. *Biol. Fertil. Soils*, 1998, **27**: 51~59.
- [15] Pierret A, Capowiez Y, Moran C J, *et al.* X-ray computed tomography to quantify tree rooting spatial distributions. *Geoderma*, 1999, **90**: 307~326.
- [16] Shirmohammadi A, and Skaggs R W. Predicating infiltration for shallow water table soils with different surface covers. *Trans. ASAE.*, 1985, **28**: 1829~1837.
- [17] Ellsworth T R, Jury W A, Ernst F R, *et al.* A three-dimensional field study of solute transport through unsaturated, layered, porous media. 1. Methodology, mass recovery and mean transport. *Water Resour. Res.*, 1991, **27**: 951~967.
- [18] Gish T J, Gimenez D and Rawls WJ. Impact of roots on ground water quality. *Plant and Soil*, 1998, **200**: 47~54.
- [19] 兰智文, 尹澄清, 赵连清. 白洋淀典型水陆交错带微景观结构分析. 见: 章申, 唐以剑等主编, 白洋淀区域水污染控制研究. 北京: 科学出版社, 1995, 109~117.
- [20] Dziejowski J E, Rimmer A and Steenhuis TS. Preferential movement of oxygen in soils? *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1997, **61**: 1607~1610.
- [21] Brix H. Gas exchange through the soil — atmosphere interphase and through dead culms of *Phragmites australis* in a constructed reed bed receiving domestic sewage. *Water Res.*, 1990, **24**(2): 259~266.
- [22] Smith M S, Thomas G W, White R E, *et al.* Transport of *Escherichia coli* through intact and disturbed soil columns. *J. Environ. Qual.*, 1985, **14**(1): 87~91.
- [23] Abu-Ashour J, Joy D M, Lee H, *et al.* Movement of bacteria in unsaturated soil columns with macropores. *Transactions of ASAE*, 1998, **41**(4): 1043~1050.
- [24] 尹澄清, 兰智文, 晏维金. 白洋淀水陆交错带对陆源营养物质的截留作用初步研究. *应用生态学报*, 1995, **6**(1): 76~80.
- [25] Yin C Q and Lan Z W. The potential use of the lake-side ecotone as a protective zone for Baiyangdian lake restoration. ICWS'94 Proceedings of the 4th International Conferences on Wetland Systems for Water Pollution Control 1994. Guangzhou, China. 1994. 791~794.
- [26] Gish T J and Jury W A. Estimating solute travel times through a crop root zone. *Soil Science*, 1982, **133**(2): 124~130.
- [27] 贾良清, 区自清. 污染物在土壤-植物系统中迁移规律的数学模拟研究: II 大孔隙和优先水流. *资源生态环境网络研究动态*, 1995, **6**(2): 16~19.
- [28] 区自清, 贾良清, 金海燕, 等. 大孔隙和优先水流及其对污染物在土壤中迁移行为的影响. *土壤学报*, 1999, **36**(3): 342~347.