

AnnAGNPS 模型土壤数据库的建立 ——以柴河上游小流域为例

马 建^{1,2}, 鲁彩艳¹, 赵 倩^{1,2}, 陈 欣¹, 史 奕¹

(1. 中国科学院沈阳应用生态研究所陆地生态过程重点实验室, 沈阳 110016; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要: AnnAGNPS 模型为针对农业非点源污染的非点源污染负荷估算模型, 从方便该模型在中国应用的角度出发, 以辽河重要支流柴河上游流域为例建立了适合该流域的 AnnAGNPS 模型土壤数据库, 并着重介绍了土壤数据库中土壤质地的转换及相关参数的获取方法。基于已建立的土壤数据库对 AnnAGNPS 模型在该流域的适用性进行了检验, 结果表明 AnnAGNPS 模型适用于该流域, 即已建立的土壤数据库适合 AnnAGNPS 模型在该地区使用。

关键词: AnnAGNPS; 农业非点源污染; 土壤质地转换; 土壤数据库

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 1672-2043(2010)增刊-0151-05

Soil Database Construction for AnnAGNPS—case Study of ChaiHe River' Supper Reaches

MA Jian^{1,2}, LU Cai-yan¹, ZHAO Qian^{1,2}, CHEN Xin¹, SHI Yi¹

(1. Key Laboratory of Terrestrial Ecological Process, Institute of Applied Ecology, Shenyang 110016, China; 2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The AnnAGNPS model is a tool to predict the load of non-point source pollution from agriculture. In this paper a soil database for AnnAGNPS was construction on the case of ChaiHe river's upper reaches. The methods of soil texture transforming were introduced as well as getting related parameters. Based on the established soil database the applicability of AnnAGNPS in this area was examined. As the results show the AnnAGNPS can be used in this area which means the established soil database was active.

Keywords: AnnAGNPS; non-source point pollution from agriculture; soil texture conversion; soil database

在点源污染得到逐步控制后, 农业非点源污染已被许多发达国家证实为水体污染的主要原因之一^[1]。由于农业非点源污染具有随机发生, 污染物来源及排放分散不确定, 污染滞后、隐蔽且监测、控制处理复杂^[2-3]等原因, 造成非点源污染的研究与控制具有较大的难度。目前, 基于数学模型的计算机模拟被认为是分析非点源污染空间分布规律的最好的技术方法之一^[4]。20 世纪 90 年代以来出现的与 GIS 相结合的 SWAT、AnnAGNPS 等大型连续分布式参数机理模型,

成为计算非点源污染负荷、关键源区识别、模拟非点源管理方案的主要技术手段^[5-7], 其中主要应用于农业非点源污染的 AnnAGNPS 模型, 虽与 ArcView3. x 紧密结合有着强大的空间数据提取能力而便于使用且效率高, 但由于该模型所需的几种重要数据中的土壤数据, 采用的是针对北美土壤植被结构设计的, 这就使其土壤数据库标准与中国现有的土壤数据标准不同, 限制了该模型的推广利用。

本文以辽河重要支流柴河上游流域为例, 着重介绍了该模型土壤数据库中土壤质地的转换及相关参数的获取方法, 并利用建立后适合该流域的土壤数据库, 结合地形、气象、土地利用等数据, 对 AnnAGNPS 模型在该地区的适用性进行了检验。

收稿日期: 2009-09-09

基金项目: 国家重大科技专项-水专项资助(2008ZX07208-007-2)

作者简介: 马 建(1982—), 男, 辽宁沈阳人, 博士研究生, 主要从事农业非点源污染方面的研究。E-mail: mroger@163.com

通讯作者: 陈 欣 E-mail: chenxin@iae.ac.cn

1 研究方法

1.1 研究区概况

柴河上游流域位于辽宁省清原县东北部,地理范围 $N42^{\circ}12' \sim N42^{\circ}15'$, $E122^{\circ}41' \sim 122^{\circ}51'$, 流域面积约为 234 km^2 。该流域年平均气温 5.3°C , 年均降雨量 810 mm , 属温带大陆性季风气候, 降雨多集中在 6—8 月。流域内地形主要为山地丘陵, 平均海拔 350 m 。流域内土壤主要潮棕壤、草甸土、棕壤性土等, 土地利用主要分为林地和耕地, 耕地以旱地间或少量水田为主。

1.2 AnnAGNPS 模型简介

连续农业非点源污染模型 AnnAGNPS (Annualized Agricultural Non-point Pollutant Loading Model) 由美国农业部农业研究局 (USDA-ARS) 与自然资源保护局 (NRCS) 共同开发, 是一个批处理过程, 能连续地按日特征模拟地表径流污染物负荷, 有助于选择最佳的管理方式 (the setting for TMDLs) 以及风险评价。AnnAGNPS 模型在保留前一代 AGNPS 模型大部分重要特征的基础上, 替代了只能模拟场次降雨而不能进行流域内长期非点源污染模拟的 AGNPS 5.0。模型结合计算机程序 TOPAZ 按照流域地形、土地利用和土壤类型等水文特征, 将流域划分成基于栅格的任意形状均质分室 (Cell), 再利用通过分级后的河网把这些分室连接起来, 并以日为尺度连续模拟各分室的径流、泥沙、养分和农药负荷量, 最终通过河道演算得到流域出口处各种污染成分的含量。为与实际情况相符, 该模型认为并非每个分室中的侵蚀产物都能到达流域出口, 部分泥沙、养分和农药可能会沉积于河网系统中。

2 结果与讨论

2.1 土壤质地体系的转换

AnnAGNPS 模型中的土壤数据是除地形、气象、土地利用数据等的又一主要输入数据, 也是需求数据种类最多的, 土壤数据与实际的相符程度对模型运行结果的好坏有重要影响。由于历史原因, 我国现有的土壤普查资料中有着多种土壤质地体系, 第一次土壤普查采用的是卡钦斯基制, 第二次采用的是国际制, 而该模型所采用的土壤质地体系是美国制, 这就使模型所需的土壤数据中的土壤粒径数据及由土壤粒径数据导出的许多重要参数如饱和导水率、田间有效持水量、土壤可蚀性系数等无法正确输入。因此, 要运

用 AnnAGNPS 模型首先就要解决不同土壤质地体系间转换的问题。

土壤质地转换以往多采用图解法, 即通过土壤颗粒大小分配曲线查找对应转换体制下某一粒径的百分含量。尽管图解法有直观的特点, 但绘制曲线的工作缓慢繁琐同时受主管影响较大, 影响转换准确性。目前土壤质地的转换主要以数学模型方法为主。在朱秋潮等研究的基础上, 蔡永明等对比了三次样条插值、二次样条插值、线性插值法插值的结果, 表明三次样条插值法最优^[8]。刘建立等比较了对数线性插值、三次样条插值这两种非参数模型和逻辑生长、改进的逻辑生长以及 Van Genuchten 经验方程等累积粒径分布模型的估计效果, 表明参数形式的改进型逻辑生长曲线模型预测效果最好^[9]。本文利用第二次全国土壤普查及辽宁土种志中的土壤粒径资料, 采用双参数修正的经验逻辑生长模型^[10], 将土壤质地由国际制转换为美国制, 并采用转换后的数值利用 SPAW 软件计算了 AnnAGNPS 模型所需的部分土壤资料值。

土壤粒径分布是指土壤固相中不同粗细级别的土粒所占的比例, 常用某一粒径及其对应的累积百分含量曲线来表示。基于全国第二次土壤普查资料, 辽宁省土壤图和《辽宁土种志》, 辽宁土壤共包括 101 个土属、253 个土种, 本文中研究区域主要地带性土壤为棕壤和草甸土。按照国际制土壤粒径分类标准, 辽宁土壤粒径大小的测定数据分为粗沙粒 ($2 \sim 0.2 \text{ mm}$), 细沙粒 ($0.2 \sim 0.02 \text{ mm}$), 粉粒 ($0.02 \sim 0.002 \text{ mm}$) 和粘粒 ($<0.002 \text{ mm}$) 四级。本文在应用双参数修正的经验逻辑生长模型时, 将每一类土壤质地的粒径完全累积分布看作 1, 其表达式为:

$$P(d) = \frac{1}{1 + [1/p(d_0) - 1] \exp(-uD^c)}$$

$$D = \frac{d - d_0}{d_0} \quad (d \geq d_0 > 0)$$

式中: $P(d)$ 是土壤粒径小于 d 的累积分布; d_0 是模型运行的最小土壤粒径, 本文中 $d_0 = 0.002 \text{ mm}$; u 和 c 为模型参数^[11]。

利用 MATLAB 或 1STOPT 等数学软件, 将不同土壤类型在国际制分类标准下的粒径分级加权求得土壤所有粒径累积分布的平均值, 采用 Levenberg—Marquardt 与通用全局优化算法, 通过回归迭代求得式中最优的 u 和 c 值。在应用 1STOPT 软件时所编写的代码如下:

Parameters u, c ;

variable x, y ;
 constant $d_0 = \min y$;
 function $y = 1 / (1 + (1/d_0 - 1) * \exp(-u * \text{abs}(x/d_0 - 1)^c))$;
 data;

2	1
0.2	0.916
0.02	0.4535
0.002	0.2176

其中所列数据为国际制土壤参数的累积值。确定模型参数 u, c 后,利用所得的 u, c 值插值求出美国制土壤粒径的粒径累积分布值。

由国际制转换为 AnnAGNPS 模型所需的美国制土壤粒径转换结果见表 1。

表 1 国际制转换为美国制的土壤粒径

Table1 the conversion result of particle fraction from international system to America system

国际制/%	累积值/%	AnnAGNPS/%
2 ~ 0.2mm 8.36	<2mm 100	>2mm 0.29
0.2 ~ 0.02mm 46.29	<0.2mm 91.6	2 ~ 0.05mm 30.81
0.02 ~ 0.002mm 23.59	<0.02mm 45.35	0.05 ~ 0.002mm 47.13
<0.002mm 21.76	<0.002mm 21.76	<0.002mm 21.76

由拟合图形的相关系数以及拟合图形与平均值的散点分布图,确定各土壤粒径累积分布相对于实测值的准确性^[11]。经验证,所得数据与实测数据具有较好的拟合性,可以作为美国制土壤粒径分布数据使用。

2.2 AnnAGNPS 模型土壤数据的获取

AnnAGNPS 模型所需的土壤数据分为土壤类型数据和土层数据两类。土壤类型数据包括①土壤水文组 (Hydrologic Soil Group)、②K 因子 (K - factor)、③反射率 (Albedo)、④不透水层深度 (Impervious Depth)、⑤比重 (Specific Gravity);土层数据包括⑥土层深度 (Depth)、⑦容重 (Bulk Density)、⑧黏土、粉沙、沙粒、石块、极细沙比率、⑨CaCO₃ 含量 (CaCO₃ Rate)、⑩饱和传导率 (Saturated Conductivity)、⑪田间持水量 (Field Capacity)、⑫凋萎点 (Wilting Point)、⑬ pH、⑭有机质比率 (Organic Matter Ratio)、有机氮 (Organic N Ratio)、无机氮比率 (Inorganic N Ratio)、⑮有机磷 (Organic P Ratio)、无机磷比率 (Inorganic P Ratio) ⑯土壤结构码 (Soil Structure Code) 等。

本文中对土壤数据的获取分为土壤类型及土层

两类,获取的数据除部分参数实地取样测定外,还参照了全国第二次土壤普查资料和《辽宁土种志》,并通过 GIS 系统在辽宁省土壤图的基础上对研究区所获得数据进行空间投影转换,形成了可供 AnnAGNPS 模型使用的土壤数据库。

2.3 土壤类型参数的计算

参数①美国农业部农业手册 AH - 703 给出了土壤水文组的分类标准,将土壤分为 A、B、C、D 四组,主要划分依据为表层土壤导水率,同时该手册给出了土壤质地的大致分类标准如表 2。

表 2 土壤水文组 (HSG) 分类标准

Table2 the classify standard of Hydrologic Soil Group

土壤水文组 (HSG)	土壤质地 (Soil textures)
A	砂质,壤质砂土,砂质壤土
B	粉砂质壤土,壤土
C	砂质粘壤土
D	粘壤土,粉砂粘壤土,砂质粘土,粉砂粘壤土,粘土

本文依据转换后的土壤粒径分级结果确定了研究区内不同土壤美国制下的粒径,并在 SPAW 软件中依据美国土壤质地分类标准求得美国标准下的土壤质地。经转换后确定研究区内的土壤多以砂质和粉砂质壤土为主,进而确定土壤水文组多为 A 类或 B 类。参数②土壤可蚀性因子 K 的大小反应了土壤抵抗水蚀能力的大小,K 值越大土壤越容易遭受侵蚀,K 值越小土壤抵抗侵蚀的能力越强。K 值的估算有很多方法,主要采用的有长年小区实测法、诺模图法、查表法及公式计算法等^[12],本文采用 Sharply 等发展的土壤可蚀性因子 K 值的估算方法^[13]公式为:

$$K = \{0.2 + 0.3 \exp[-0.0256sd(1 - Si/100)]\} \left(\frac{Si}{Cl + Si} \right)^{0.3} \left[1 - \frac{0.25c}{c + \exp(3.72 - 2.95c)} \right] \left[1 - \frac{0.7Sn}{Sn + \exp(-5.51 + 2.29Sn)} \right]$$

式中: $Sn = 1 - Sd/100$; Sd 砂砾、 Si 粉粒、 Cl 粘粒、 C 有机碳含量 (%)。公式中粒径数据均采用转化后的美国制,有机碳含量采用有机质含量除以 1.724 的经验公式求得^[14]。

本文中有有机质参数为《辽宁土种志》中的测定结果,参数③反射率随自然条件而异,季节变化范围很大,植物的生长、植被特性的变化都可使反射率改变,因此反射率的测定具有很多不确定性。由于条件所限无法实地测定,本文中反射率做空白处理。在默认

空白处理时 AnnAGNPS 模型认为土壤的反射率取值为 0.2^[15]。参数④不透水层深度,正常情况下除非土层下有不透水层并已知该深度会将该数据输入,本研究区的土壤经实地取样时调查及参考所获得的土壤普查资料基本无不透水层,因此该参数在本文中取模型默认的空白值即无不透水层。参数⑤比重,AnnAGNPS 模型中土壤比重为土壤质量/土壤水质量,本文中的土壤比重为不同土壤实地取样后的测定值。

2.4 土层数据参数的计算

由于我国现有的可获得的土壤普查资料难以完全满足构建 AnnAGNPS 模型数据库的需要,参数⑩饱和导率(Saturated Conductivity)⑪田间持水量(Field Capacity)、⑫凋萎点(Wilting Point)等采用美国农业部开发的土壤水特性计算程序 SPAW 中的土壤水特性(Soil Water characteristics)模块^[16-17]进行计算,所用土壤粒径分级均采用经过转换的美国制。

参数⑥为土壤表面到该土层底的深度,运行时模型会以 200 mm 为界限把所输入的数据缩减为两层土壤剖面^[18],在应用时往往取耕作层深度数据,本文中土层深度取《辽宁土种志》中不同土壤类型耕作层深度。参数⑭⑮所需数据我国的土壤资料中缺乏,本文中数据为实地取样后获得。有机磷采用硫酸与氢氧化钠浸提法,由于本文中土壤多为中性,无机磷的测定采用中性、石灰性土壤无机磷形态的分级测定方法。本文中无机氮为土壤铵态氮和硝态氮之和,采用 MgO-代氏合金蒸馏法,有机氮通过测定土壤全氮后与无机氮的差值求得,土壤全氮为开氏法^[14]。依据实地取样测定不同土壤的 pH 值获得了参数⑬。参数⑯AnnAGNPS 中土壤结构码为土层的团粒土壤结构的平均尺寸,1 表示极细粒(<1 mm);2 表示细粒(1~2 mm);3 表示中粒或粗粒(2~5 mm);4 表示块状、板状或大块(>5 mm)。在所获得的土壤资料中只有不同土壤的孔隙度,因此本文中土壤团粒大小由土壤孔隙度推算得出采用阿·尼·道耶连柯的团粒大小与土壤孔性关系(见表 3)^[19]来确定团粒的大小。

表 3 土壤团粒大小与土壤孔隙度关系

Table 3 The relation of aggregate soil structure size and soil pore space

团粒直径/mm	<0.5	0.5~1.0	1.0~2.0	2.0~3.0	3.0~5.0
土壤总孔度/%	47.5	50.0	54.7	59.6	62.6

在获得相关土壤结构后即可依据 AnnAGNPS 模型的分级标准获得相应的土壤结构码。剩余参数⑦容重,⑧黏土、粉沙、沙粒、石块、极细沙比率,⑨CaCO₃含量采用《辽宁土种志》和第二次土壤普查资料中的相关数据。由此 AnnAGNPS 模型所需土壤参数基本确定。

结合土壤图对每一类土壤的分类给予一个 ID 值,并将所获得的不同类型土壤的参数依据该 ID 值进行分类,利用 AnnAGNPS 模型的输入编辑器(AGNPS InputEditor)进行输入,与地形、土地利用管理等数据共同构成 AnnAGNPS 模型的输入文件 AnnAGNPS.inp,即可与经过投影后的矢量化土壤图共同使用,构成 AnnAGNPS 模型的数据库。

2.5 AnnAGNPS 模型土壤数据库的应用

为验证所建立的土壤数据库的有效性,利用所建立的土壤数据库结合地形、土地利用及清原地区 1999—2008 年的逐日气象资料等数据,运用 AnnAGNPS 模型对研究区内农业非点源污染负荷进行模拟运算,并通过 2007—2008 年的实地取样,进行了 AnnAGNPS 模型在该地区的适用性检验。分别对金家水库、猴石、金庄子等 3 个取样点水体总氮、总磷浓度的平均实测值与模拟值进行对比,结果见图 1、2。

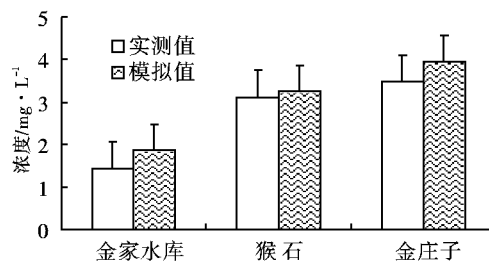


图 1 水体总氮实测值与模拟值

Figure 1 The measured value and simulated value of total N concentration in water

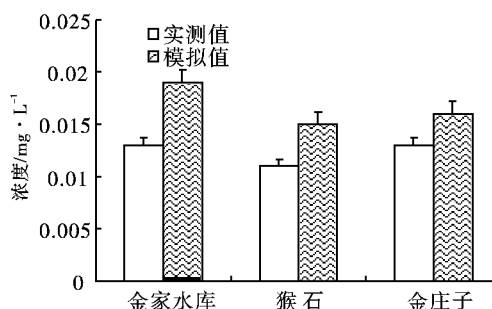


图 2 水体总磷实测值与模拟值

Figure 2 The measured value and simulated value of total P concentration in water

AnnAGNPS 模型的适用性结果表明,该模型对该地区的农业非点源污染负荷总氮的模拟效果要好于总磷的模拟效果,这与 Novotny 等^[20]的研究结果相符并都表现出从流域上游至下游负荷逐渐增大的趋势。表明 AnnAGNPS 模型适合在该地区使用,这也间接证明了所建立土壤数据库在该地区的可用性及有效性。

3 结论

通过双参数修正的经验逻辑生长模型进行了土壤质地的转换,并利用转换结果结合 SPAW 软件计算的数值,利用实地土壤取样测定结果及国内土壤普查资料,以柴河上游流域为例构建了 AnnAGNPS 模型土壤数据库。对 AnnAGNPS 模型在该地区的适用性检验表明,AnnAGNPS 模型适合在该地区适用,从而间接证明所建立的土壤数据库及所使用的方法可行。

参考文献:

- [1] 王飞儿,吕唤春,陈英旭,等. 基于 AnnAGNPS 模型的千岛湖流域氮、磷输出总量预测[J]. 农业工程学报,2003,19(6):281-284.
WANG Fei'er, LV Huanchun, CHEN Yingxu, et al. Prediction of output loading of nitrogen and phosphorus from Qiandao Lake watershed based on AnnAGNPS model[J]. *Transactions of the CSAE*, 2003, 19(6):281-284.
- [2] 李怀恩. 流域非点源污染模型研究进展与发展趋势[J]. 水资源保护,1996,2:14-18.
LI Huaen. Advances and prospects of catchment non-point pollution model[J]. *Water Resources Protection*, 1996, 2:14-18.
- [3] 贺缠生,傅伯杰,陈利顶. 非点源污染的管理及控制[J]. 环境科学,1998,19(5):87-91,96.
HE Chan-sheng, FU Bo-jie, CHEN Li-ding. Non-point source pollution control and management[J]. *Scientiae Circumstance*, 1998, 19(5):87-91,96.
- [4] Heng H H, Nikolaidis N P. Modeling of non-point source pollution of nitrogen at the watershed scale [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 1998, 34(2):359-374.
- [5] Francos C, Bidoglio G, Galbiati L, et al. Hydrological and water quality modelling in a medium-sized coastal basin [J]. *Phys Chem Earth*, 2001, 26(1):47-52.
- [6] Baginska B, Milne-Home W, Cornish P S. Modelling nutrient transport in Currency Creek, NSW with AnnAGNPS and PEST [J]. *Environment Modeling & Software*, 2003, 18: 801-808.
- [7] Tong S T Y, Chen W L. Modeling the relationship between land use and surface water quality [J]. *Journal of Environmental Management*, 2002, 66(4):377-393.
- [8] 蔡永明,张科利,李双才. 不同粒径间土壤质地资料的转换问题研究[J]. 土壤学报,2003,40(4):511-515.
CAI Yong-ming, ZHANG Ke-li, LI Shuang-cai. Study on the conversion of different soils texture [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(4):511-515.
- [9] 刘建立,徐绍辉,刘慧. 几种土壤累积粒径分布模型的对比研究[J]. 水科学进展,2003,14(5):588-592.
LIU Jian-li, XU Shao-hui, LIU Hui. Investigation of different models to describe soil particle size distribution data [J]. *Advances In Water Science*, 2003, 14(5):588-592.
- [10] Skaggs T H, Arya L M, Shouse P J, et al. Estimating particle-size distribution from limited soil texture data [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2001, 65: 1038-1044.
- [11] 门明新,赵同科,彭正萍,等. 基于土壤粒径分布模型的河北省土壤可蚀性研究[J]. 中国农业科学,2004,37(11):1647-1653.
MEN Ming-xin, ZHAO Tong-ke, PENG Zheng-ping, et al. study on the soil erodibility based on the soil particle-size distribution in Hebei Province [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(11):1647-1653.
- [12] 刘世杰,傅伯杰,马克明,等. 岷江上游高原植被类型与景观特征对土壤性质的影响[J]. 应用生态学报,2004,15(1):26-30.
LIU Shi-jie, FU Bo-jie, MA Ke-ming, et al. Effects of vegetation types and landscape features on soil properties at the plateau in the upper reaches of Minjiang River [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(1):26-30.
- [13] Sharply A N, Williams J R. EPIC-erosion-productivity impact calculator: Model documentation. [J]. *USDA Technical Bulletin*, NO. 1768, 1990.
- [14] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社,2000:106-108,147,166,172.
LU Ru-kun. Soil and agricultural chemistry analysis methods [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000:106-108,147,166,172.
- [15] Ronald L, Bingner Fred D. Theurer Yongping Yuan AnnAGNPS T [H]. AnnAGNPS V3.5 July 2007.
- [16] Saxton K E, Rawls W J, Romberger J S, et al. Estimating generalized soil-water characteristics from texture [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1986, 50(4):1031-1036.
- [17] Saxton K E, Rawls W J. Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions [EB/OL]. <http://users.adelphia.net/~ksaxton/SPAW%20Download.html/200609>.
- [18] AnnAGNPS Version 4.00 Input File Specifications [H]. USDA-ARS July 2007.
- [19] 黄昌勇,等. 土壤学[M]. 北京:中国农业出版社,2000,86.
HUANG Chang-yong, et al. Soil science [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000:86.
- [20] Novotny N Olem H. Water Quality: Prevention, identification, and management of diffuse pollution [M]. *Van Nostrand Reinhold*, 1993.