

淀山湖蓝藻碎屑的好氧降解和营养盐释放规律研究

孙远军* (上海市环境科学研究院,上海 201200)

摘要: 收集淀山湖的水华蓝藻,经超声波处理后,研究死亡蓝藻的好氧降解及营养盐释放规律.结果表明,蓝藻细胞有机碳的矿化速率为 9.415mg/(L·d),有机氮的氨化速率为 0.441mg/(L·d),有机磷的降解速率为 0.044mg/(L·d),好氧降解将会造成溶解态营养盐的大量释放,降解后硝态氮和正磷酸盐分别比初始值高 4.22 倍和 4.20 倍.

关键词: 淀山湖; 蓝藻; 好氧降解; 营养盐释放

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2013)11-2047-06

Study on the aerobic decomposition and nutrient release of cyanobacteria detritus in Dianshan Lake. SUN Yuan-jun* (Shanghai Environment Science Academy, Shanghai 201200, China). *China Environmental Science*, 2013,33(11): 2047~2052

Abstract: The aerobic degradation and nutrients release rule of cyanobacteria debris collecting from Dianshan Lake was studied, after ultrasonic treatment. The results showed that the cyanobacterial cell mineralization rate of organic carbon was up to 9.415mg/(L·d), the ammonification rate of organic nitrogen up to 0.441mg/(L·d), the degradation rate of organic phosphorus up to 0.044mg/(L·d). Aerobic degradation will result in a massive release of dissolved nutrient, the nitrate and orthophosphate concentration was 4.22 and 4.20 times higher than initial value after degradation.

Key words: Dianshan Lake; cyanobacteria; aerobic decomposition; nutrient salts release

淀山湖地处上海、江苏和浙江的交界处,是太湖水系的一个重要组成部分,是上海最大的淡水湖泊,在江南水资源保护中占相当重要地位.作为黄浦江的重要水源地,淀山湖兼具交通运输、调节径流、农田排灌、水上航运、水产养殖以及交通运输等功能^[1-2].随着周围工、农业的发展和人口的增长,大量污染物进入湖内,水体水质不断恶化,湖内浮游植物的生物多样性减少,正逐步向以绿藻-蓝藻为主的群落结构演替^[3-5],随着营养盐含量的升高,部分湖区的富营养化程度也不断恶化^[6].1985 年淀山湖首次大规模爆发藻类“水华”^[7],2007 年淀山湖共出现了 3 次蓝藻“水华”,其中 8 月 30 日的“水华”是 1986 年以来最为严重的一次^[8],2009 年 9 月在淀山湖的西部和南部区域也出现了蓝绿藻的大面积堆积.这严重威胁淀山湖生态系统的健康发展和水体的使用功能.

氮和磷被认为是造成水体富营养化的主要营养物质^[9].除了入湖河流、地表径流、湖面降水等外源输入外,营养盐的动态、静态内源释放也

导致淀山湖水体维持在较高的养化水平^[10-12].在水力作用下,湖内死亡藻类的重新分解也会产生大量颗粒态、溶解态和胶体态的营养盐^[13-15],这部分内源释放的营养物将会重新进入湖体的物质循环圈,为藻类的生长所利用^[16].所以,有必要对蓝藻死亡后降解及营养盐释放的规律进行了解.淀山湖属于典型的平原浅水湖,水体溶解氧含量较高,在夏季也保持在 3mg/L 以上的水平.本研究采集淀山湖的水华蓝藻,在实验室条件下模拟藻类死亡后的好氧降解过程,分析因降解而引起的氮、磷不同形态营养物的动态释放过程.

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 样品采集 2012 年 9 月,在淀山湖西南方位藻类大量堆积区,用孔径 64μm 的浮游生物网

收稿日期: 2013-03-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11032007)

* 责任作者, 博士, sunyj@saes.sh.cn

收集表层的水华藻类,除去较大的杂物颗粒,放于 1000mL 的采样瓶内,于低温环境下快速送至实验室,经镜检发现蓝藻门中的微囊藻约占 96%。同时采集表层水体,经 64 μ m 的筛网滤去大颗粒悬浮物和浮游生物后,作为实验的培养用水。试验用湖水水质的背景值如下:氨氮 0.287mg/L,硝氮 0.700mg/L,总氮 1.690mg/L,正磷酸盐 0.013mg/L,溶解态总磷 0.049mg/L,总磷 0.107mg/L,总有机碳 5.580mg/L,COD_{Cr} 37mg/L,叶绿素 a 0.019mg/L。

试验于 2012 年 9 月 15~29 日进行,每天上午 9:00 将箱内水体搅拌均匀,采集中层水样,分别进行铵态氮、硝酸盐氮、总氮、正磷酸盐、溶解态总磷、总磷和 TOC 等指标的测定,取样后补充等量的蒸馏水。

1.1.2 试验装置 用 2 个 50cm×37.5cm×24.5cm 的不透明的长方体塑料水箱作为降解试验的反应器,里面加入过滤后的湖水至 20cm 深处。降解试验在实验室内进行,室温控制在 25℃ 左右。接近水箱底部的 4 个边角分别放置 1 个小型潜水泵,在水泵推流的作用下箱内湖水呈流动状态,这样在保证颗粒物悬浮的同时,还可以加强大气复氧作用,使箱内湖水为好氧状态。水箱顶部覆盖黑色塑料纸,使整个反应器完全避光。

将收集到的水华藻类置于超声波清洗器(超声功率设置为 100%)中超声 1h,结束时发现原本上浮的微囊藻均匀地分布在采样瓶内,该过程认为可以强制将微囊藻致死。参照文献[8-10]。取超声处理过的藻液 50g 倒入 1[#]水箱内。未加藻液的 2[#]水箱即为对照试验,

1.1.3 仪器 MultiN/C 3100 型 TOC 分析测定仪,YSI 58 型溶氧仪,01J2003-04 型立式压力蒸汽灭菌器,DHG-9031A 型电热恒温干燥箱,T6-新世纪可见/紫外分光光度计,KQ-250DE 型数控超声波清洗器,BS 223S 型分析天平,DRB200 型 COD 微回流反应器,DR/2800 型分光光度计等。

1.2 样品分析方法

溶解氧采用膜式电极法由溶氧仪测定,铵态氮、硝酸盐氮、总氮、正磷酸盐、溶解态总磷、总磷按《水和废水监测分析方法》^[17]的标准方法进行,叶绿素-a 采用乙醇浸提再分光光度测定

的方法^[18-19],TOC 采用 Multi N/C3100TOC 分析仪测定。数理统计、图像处理分别由 SPSS 15.0 统计软件和 origin7.0 完成。

2 试验结果

2.1 水中叶绿素 a 含量的变化过程

蓝藻属于原核生物,没有叶绿体,其叶绿素 a 位于细胞内的光合片层上^[20]。藻细胞死亡后,光合片层随着细胞体破裂而释放,片层内的叶绿素含量也随之不断衰减。由于叶绿素 a 的降解需要一定时间,所以如果用叶绿素间接表征活体藻类数量,会产生一定的滞后。在实验过程中对箱内水体 chl-a 的含量进行监测,结果如图 1 所示。

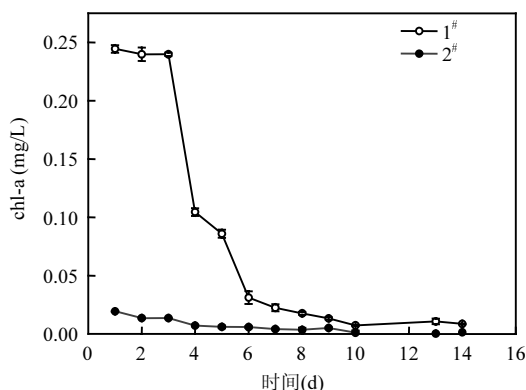


图 1 死亡蓝藻好氧降解过程中水体 Chl-a 的浓度变化
Fig.1 Chl-a concentration in the aerobic degradation process of death cyanobacteria

从图 1 可以看出,2 组实验中叶绿素 a 的变化趋势存在显著差别($P=0.0116$)。藻类经超声处理后水体叶绿素 a 的含量从第 3d 开始快速下降,从 0.240mg/L 减少到 0.105mg/L。之后 2d 下降速度变小,第 6d 后速度进一步减小,第 9d 后叶绿素含量与对照试验相当,9d 后叶绿素的减少量占初始值的 92.06%,说明绝大多数蓝藻已经死亡。由于过滤作用,对照体系中所剩的藻类本来就有限,chl-a 的初始含量仅 0.019mg/L,之后逐渐下降至 0.001mg/L 左右。

2.2 水中氮素的变化过程

试验过程中水体中氮素的变化过程如图 2 所示。由于试验在好氧状态下进行,无反硝化过程

发生,所以 2 个体系总氮的含量都很稳定,分别保持在 5.69~6.79mg/L 与 1.46~2.18mg/L 之间.1[#]体系中总氮的含量明显高于对照试验($P<0.05$),原因主要在于藻体的增加.

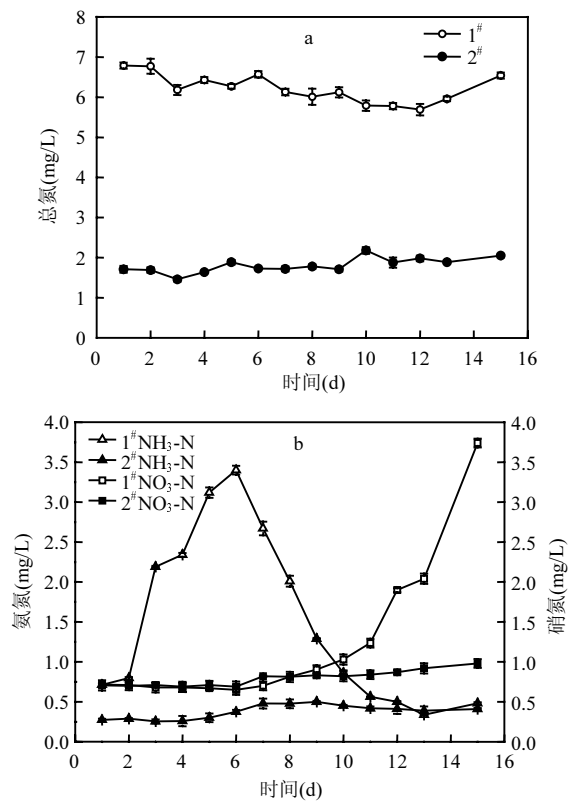


图2 死亡蓝藻好氧降解过程中水体氮素的浓度
Fig.2 nitrogen concentration in the aerobic degradation process of death cyanobacteria

藻类死亡后,有机氮在微生物的作用下向无机氮转化.从图 2b 中可以看出,1[#]试验体系第 2d 氨氮的含量上升并不明显,但是在第3~6d期间氨氮含量从 0.797mg/L 迅速提高到 3.400mg/L,之后由于硝化反应而不断下降,12d 后基本稳定在与对照试验相当的水平,约为 0.5mg/L.硝态氮的含量在试验前几天变化不大,在第 7~10d 的时间内含量开始缓慢升高,由 0.700mg/L 升高至 1.030mg/L,之后上升速度加快,直到试验结束含量仍在增加,试验结束时硝态氮含量比初始值高 4.22 倍.对照试验中,氨氮和硝态氮的含量都有所升高,但是变化不大,分别从 0.273mg/L 升高至

0.409mg/L,从 0.706mg/L 升高至 0.980mg/L.虽然温度等环境都满足硝化反应的条件,但是仍然没有发生显著的硝化反应,原因可能在于水样取自天然湖泊,水中各污染物组分都已趋于动态平衡.

2.3 水中磷素的变化过程

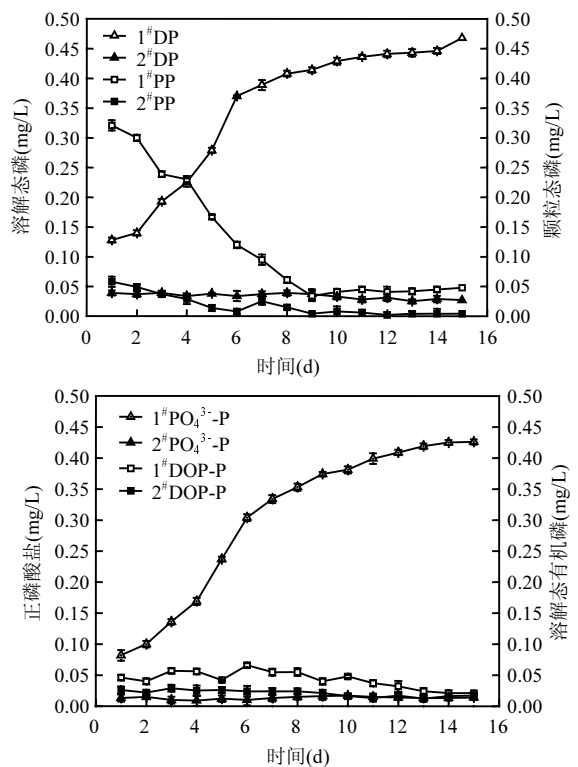


图3 死亡蓝藻好氧降解过程中水体磷素的浓度
Fig.3 phosphorus concentration in the aerobic degradation process of death cyanobacteria

试验过程中水体内磷素的变化过程如图 3 所示.从图 3a 可以看出,1[#]体系溶解态总磷与颗粒态磷的变化都与对照试验存在显著差异($P<0.05$).颗粒态磷在前 9d 不断下降,由初始的 0.321mg/L 下降至 0.034mg/L,几乎减少了 90%,之后渐趋稳定.与此相反,溶解态磷的含量在前 6d 快速升高,从 0.128mg/L 升高了将近 3 倍,之后速度减慢,到 11d 后逐渐稳定.试验开始,1[#]体系中总磷主要由颗粒态磷构成,其含量占总量的 50% 以上,但是试验结束后溶解态磷含量远远高出颗粒态磷,这是由于在微生物作用下颗粒态的有机磷被降解,转化成无机磷释放进入水体.对照试验

中溶解态磷含量较低,在试验期间变化不大,基本维持在 0.025~0.054mg/L 的范围内,颗粒态磷的含量低于溶解态磷,在试验期间呈不断下降趋势,9d 以后逐渐稳定在 0.010mg/L 以下.

水体溶解态磷由正磷酸盐和溶解态有机磷构成,试验过程中 2 个体系溶解态磷组分的变化过程如图 3b 所示.可以看出,1[#]体系的正磷酸盐和溶解态有机磷含量均高于对照试验($P<0.05$),这与添加的藻类有关.1[#]体系中正磷酸盐的含量在试验的前 6d 迅速从 0.082mg/L 提高至 0.304mg/L,升高速率可达 0.048mg/(L·d),之后增加的速度变慢,约为 0.015mg/(L·d),实验结束时正磷酸盐含量比初始值高出 4.20 倍.溶解态有机磷的含量变化不明显,前 6d 仅有微量上升,之后逐渐下降至与对照试验相当的水平,基本维持在 0.040~0.107mg/L.对照试验中,2 种溶解态磷的含量都很低,并且在试验过程中无明显变化,分别维持在 0.050~0.037mg/L 和 0~0.044mg/L 的范围内.

2.4 水中有机的变化过程

试验过程中水体有机碳的浓度变化过程如图 4 所示,可以看出,1[#]体系 TOC 的浓度变化趋势与对照试验有着显著差异($P<0.05$).1[#]体系的 TOC 含量在前 3d 呈现快速下降的趋势,从 40.68mg/L 下降至 21.85mg/L,之后下降速度变慢,10d 以后基本趋于稳定状态.对照体系中的

TOC 含量较为稳定,在试验过程中变化不大,基本维持在 5.31~7.78mg/L 的范围内.

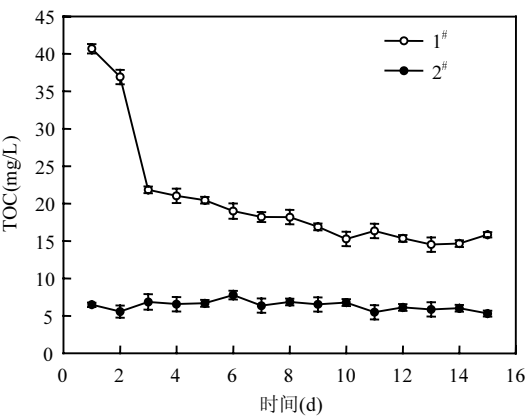


图 4 死亡蓝藻好氧降解过程中水体 TOC 的浓度
Fig.4 TOC concentration in the aerobic degradation process of death cyanobacteria

3 分析与讨论

3.1 蓝藻碎屑好氧降解的过程分析

水华藻类死亡后形成大量颗粒态碎屑和胶体物质,在微生物的作用下有机物进行降解,生成溶解态的有机碳和营养盐进入水体^[14].对 1[#]体系试验过程中叶绿素、氨氮、硝酸盐氮、正磷酸盐、溶解态总磷和颗粒态磷的含量进行相关性分析,结果如表 1 所示.

表 1 氮、磷、叶绿素与有机碳间的相关系数
Table 1 Pearson correlations of concentration of N, P, chl-a and TOC

参数	PO ₄ ³⁻	DTP	PP	DOP	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	Chl-a	TOC
PO ₄ ³⁻	1							
TDP	0.995**	1						
PP	-0.994**	-0.998**	1					
DOP	-0.501	-0.411	0.414	1				
NH ₄ ⁺ -N	-0.322	-0.247	0.254	0.786**	1			
NO ₃ ⁻ -N	0.618*	0.554*	-0.557*	-0.827**	-0.608*	1		
Chl-a	-0.947**	-0.962**	0.958**	0.302	0.091	-0.444	1	
TOC	-0.861**	-0.880**	0.877**	0.233	-0.018	-0.424	0.870**	1

注:* 显著性水平为0.05(双尾检验);**显著性水平为0.01(双尾检验)

由表 1 可知,颗粒态磷 PP 与间接表征蓝藻生物量的叶绿素 a 呈显著的正相关性,与溶解态总磷 DTP 呈显著的负相关性,说明水体颗粒态磷与

蓝藻细胞同源,随着好氧降解的进行,藻细胞破裂,光合片层上的叶绿素衰减,细胞内颗粒态的磷释放进入水体,转化成溶解态磷,颗粒态磷含量降低,

溶解态磷含量上升.DTP 与正磷酸盐呈显著的正相关性,说明水体中的溶解态磷主要构成成分是正磷酸盐,藻类中的颗粒态磷在微生物的降解作用下以无机正磷酸盐的形式释放.

蓝藻细胞死亡后,藻细胞内的有机氮在微生物参与下发生氨化作用,有机氮转化成铵态氮,好氧条件下硝化细菌先把铵态氮氧化成亚硝态氮,之后再进一步氧化成硝态氮^[21].所以 1[#]实验体系铵态氮含量呈现先上升后下降,硝酸盐在铵态氮下降后的第 3d 才开始快速增长,铵态氮与硝态氮之间存在负相关关系.

由表 1 可以看出,水体有机碳含量与叶绿素含量之间存在显著的正相关性,说明实验体系内有机碳主要来源于死亡藻类碎屑.在微生物的矿化作用下,高分子含碳有机物首先被降解成低分子有机碳,在溶解氧充足的情况下进一步转化成二氧化碳释放进入空气.

3.2 蓝藻碎屑碳、氮、磷释放特性的比较

1[#]试验体系铵态氮含量在前 3d 的增长速率为 0.441mg/(L·d),硝态氮在第 9~11d 期间的增长速率为 0.129mg/(L·d),之后增加到 0.610mg/(L·d).上述结果表明,死亡蓝藻碎屑在第 3d 至第 6d 的降解过程以氨化反应为主,8d 后硝化反应启动,直到实验结束硝化反应仍在持续进行.比较实验前后 1[#]试验体系颗粒态氮含量可知,在 15d 时间内蓝藻碎屑内 56.75%的有机氮可好氧降解为被浮游植物直接利用的硝态氮.从 1[#]体系的试验数据可以看出,死亡蓝藻碎屑有机磷主要以正磷酸盐的形式释放进入水体,中间产生的溶解态有机磷数量有限.释放过程主要集中在前 6d,期间正磷酸盐的释放量占释放重量的 71.53%,释放速度可达 0.048mg/(L·d).比较颗粒态磷前后的浓度变化,可知在 15d 时间内蓝藻碎屑内 85.04%的颗粒态磷可好氧降解为被浮游植物直接利用的正磷酸盐.

从 1[#]体系的试验结果可以看出,蓝藻死亡后有机碳矿化过程随即进行,其中易于生物利用的小分子有机碳先被生物降解,有机碳含量在前 2d 的矿化速度为 9.415mg/(L·d),2d 时间内完成全部矿化量的 73.33%.由于易降解物质已被降解,在

第 3~10d 矿化速率变慢,有机碳下降速率仅为 0.88mg/(L·d),10d 后有机碳含量变化不大,矿化过程基本结束,矿化率可达 61.04%.

4 结论

4.1 好氧条件下,在 15d 的时间内死亡蓝藻碎屑颗粒态氮的矿化率达 56.75%,颗粒态磷的矿化速率达 85.04%,有机碳的矿化速率达 61.04%.

4.2 好氧条件下,死亡蓝藻碎屑中的有机碳被微生物矿化成 CO₂,前 2d 的矿化速率最大,可达 9.415mg/(L·d),2d 时间内完成全部矿化量的 73.33%,矿化时间持续 10d 左右.

4.3 好氧条件下,死亡蓝藻碎屑中有机氮的氨化速率为 0.441mg/(L·d),6d 后硝化反应启动,铵态氮先后被氧化成亚硝态氮和硝态氮,硝化反应持续时间长,实验结束时仍在成持续.

4.4 好氧条件下,死亡蓝藻碎屑中的有机磷被转化成溶解态磷,其主要成分为正磷酸盐.有机磷的转化主要集中在前 6d,释放速率为 0.048mg/(L·d),6d 时间完成转化总量的 71.53%.

4.5 水华发生后,短时间内大量蓝藻死亡,在微生物的降解作用下,死亡蓝藻释放出可被浮游植物直接利用的氮、磷营养物,硝态氮和正磷酸盐的含量分别提高 4.22 倍和 4.20 倍,由此产生的内源负荷值得重视.

参考文献:

- [1] 吴阿娜,朱梦杰,汤琳,等.淀山湖蓝藻水华高发期叶绿素 a 动态及相关环境因子分析 [J]. 湖泊科学, 2011,23(1):67-72.
- [2] 王铭玮,徐启新,车越,等.淀山湖蓝藻水华暴发的气象水文因素探讨 [J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2011,1(1):21-31.
- [3] 程曦,李小平.淀湖氮磷营养物 20 年变化及其藻类增长响应 [J]. 湖泊科学, 2008,20(4):409-419.
- [4] 张亚克,梁霞,何池全,等.淀山湖不同季节营养盐含量与藻类群落的相互关系 [J]. 湖泊科学, 2011,23(5):747-752.
- [5] 王丽卿,许莉,卢子园,等.淀山湖浮游植物数量消长及其与环境因子的关系 [J]. 环境科学, 2011,32(10):2868-2874.
- [6] 李宏祥,田华,梁国康.淀山湖富营养化现状及生态修复措施分析 [J]. 水资源保护, 2012,28(3):83-87.
- [7] 阮仁良,屠鹤鸣,王云.淀湖水水质监测及富营养化对策研究 [J]. 上海水利, 1997(3):35-38.
- [8] 汤琳,张锦平.淀山湖蓝藻水华预警监测业务化体系的研究

- [C]. 中国环境科学学会 2009 年学术年会论文集(第四卷), 2009:571-575.
- [9] 刘建康.东湖生态学研究(一) [M]. 北京:科学出版社, 1990:379-405.
- [10] 康丽娟.淀山湖沉积物碳-氮垂直分布特征 [J]. 环境科学与技术, 2011,34(12H):13-16.
- [11] 苏丽丹,林卫青,杨漪帆,等.淀山湖底泥氮、磷释放通量的研究 [J]. 环境污染与防治, 2011,33(5):32-35.
- [12] Wang H, Appan A, Gulliver J S. Modeling of phosphorus dynamics in aquatic sediments: I -model development [J]. Water Research, 2003,37:3928-3938.
- [13] 孙小静,秦伯强,朱广伟.蓝藻死亡分解过程中胶体态磷、氮、有机碳的释放 [J]. 中国环境科学, 2007,27(3):341-345.
- [14] 陈伟民,蔡后建.微生物对太湖微囊藻的好氧降解研究 [J]. 湖泊科学, 1996,8(3):248-252.
- [15] 史红星,刘会娟,曲久辉,等.富营养化水体中微囊藻细胞碎屑对氨氮的吸附特性 [J]. 环境化学, 2005,24(3):241-244.
- [16] 刘丽贞,秦伯强,朱广伟.太湖蓝藻死亡腐烂产物对狐尾藻和水质的影响 [J]. 生态学报, 2012,32(10):3154-3159.
- [17] 国家环境保护局.水和废水监测分析方法 [M]. 北京:中国环境科学出版社, 1989.
- [18] 张丽彬,王启山,徐新惠,等.乙醇法测定浮游植物叶绿素 a 含量的讨论 [J]. 中国环境监测, 2008,24(6):9-10.
- [19] 韩建刚,荆玉静,李萍萍.乙醇提取浮游藻类叶绿素 a 的方法优化研究 [J]. 江苏农业科学, 2013,41(1):316-318.
- [20] 翟中和,王喜忠,丁明孝.细胞生物学.2000.北京:高等教育出版社.
- [21] 贺纪正,张丽梅.氨氧化微生物生态学与氮循环研究进展 [J]. 生态学报, 2009,29(1):406-415.
- 作者简介: 孙远军(1980-),女,河南商丘人,博士,主要从事水体生态修复方面的研究.发表论文 10 篇.

利用雨水计算器帮助管理雨水径流以减少水污染

作为奥巴马总统气候行动计划的一部分,美国环境保护署(EPA)今天发布了国家雨水计算器,这是 1 个对于政府虚拟气候弹性工具包的创新性附加.EPA 的新计算器将帮助业主、开发商、景观设计者以及城市规划师制定明智的土地使用政策,以保护当地水道免受雨水径流引起的污染.防止影响饮用水源以及当地生态系统的雨水径流可以保护公众健康和环境.

该计算器是 6 月总统气候行动计划宣布的雨水计算器以及气候评价工具包的第 1 阶段,是 1 个用于评估特定场地年雨水径流量的桌面应用,这一应用基于当地土壤条件、斜率、地表覆盖以及历史降雨记录.用户可以进入所有美国的地点并选择不同的情景来学习特定的绿色基础设施变化如何来预防污染,这类绿色基础设施包括诸如接雨水桶及雨水庭院等低成本变化.这一信息帮助用户确定如何添加绿色基础设施才是减少雨水径流最为划算的方法之一.

EPA 研究与发展部门的主任副行政助理 Lek Kadeli 表示:“EPA 的研究是要提供创新的解决方案来保护我们国家的水资源.雨水计算器演示了不同类型绿色基础设施的方法,这些途径可以预防洪水、节能、改善空气质量、增加房产价值、更为健康的社区以及为美国人民节省开支.”

每年,数十亿加仑未经处理的污水、垃圾、家庭化学品以城市径流进入到溪流、河流及湖泊.受污染的雨水径流会对植物、动物以及人类产生不利影响.也会对经济产生不利影响——在受污染区域,从关闭的海滨到渔业及狩猎减少.绿色基础设施是促进健康水发展及支持可持续社区的 1 个经济的解决方案.

2013 年底会发布 1 个雨水计算器的更新,将包括与未来不同气候情景连接的能力.气候预测表面极端降水事件作为气候变化可能变得更为频繁.

朱 悦 译自 EPA Software Helps Reduce Water Pollution as Part of President's Climate Action Plan—National stormwater calculator helps manage stormwater runoff