

胡绵好,袁菊红,张玲,等. 2009 不同品种黑麦草对富营养化水体净化能力的比较 [J]. 环境科学学报, 29(8): 1740– 1749
Hu M H, Yuan JH, Zhang L, *et al*. 2009 Comparative studies on the purification ability of different kinds of ryegrass (*Lolium L.*) in a eutrophic water body[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 29(8): 1740– 1749

不同品种黑麦草对富营养化水体净化能力的比较

胡绵好^{1, 2},袁菊红¹,张玲²,杨肖娥^{2*}

1 江西财经大学资源与环境管理学院,南昌 330032
2 污染环境修复与生态健康教育部重点实验室,浙江大学环境与资源学院,杭州 310029
收稿日期: 2008-10-22 修回日期: 2009-03-09 录用日期: 2009-06-03

摘要: 利用浮床植物系统研究了不同品种黑麦草在富营养化水体中的生长特性和净化效果差异. 结果表明, 12个黑麦草品种在冬春季富营养化水体中均能良好生长, 净化效果非常明显, 对 TN、TP、COD_{Mn} 和 BOD₅ 的去除率分别高达 73. 68%、84. 69%、87. 87% 和 75. 85%; 同时, 还能使富营养化水体中 pH 值降低, 溶解氧浓度明显升高. 室内试验植物地上部 N、P 积累量分别在 46. 86~ 145. 25 mg m⁻² d⁻¹ 之间和 11. 39~ 42. 74mg m⁻² d⁻¹ 之间; 室外试验植物地上部 N、P 积累量分别为 61. 5~ 168. 2 mg m⁻² d⁻¹ 和 11. 9~ 47. 2mg m⁻² d⁻¹; 且植物体内 N、P 积累量与其生物量之间存在着明显的相关性 ($r \geq 0. 90$). 品种间差异显著 ($p < 0. 05$), 其中, 以邦德、安格斯 2 号和牧杰对富营养化水体净化的综合能力表现最好.
关键词: 黑麦草; 富营养化水体; 净化能力
文章编号: 0253-2468 (2009) 08-1740-10 中图分类号: X52 文献标识码: A

Comparative studies on the purification ability of different kinds of ryegrass (*Lolium L.*) in a eutrophic water body

HU M ianhao^{1, 2}, YUAN Juhong¹, ZHANG Ling², YANG X iao'e^{2*}
1 College of Resource & Environment Management, Jiangxi University of Finance & Economics, Nanchang 330032
2 MOE Key laboratory, Environmental Remediation and Ecosystem Health, College of Environmental & Resource Science, Zhejiang University, Hangzhou 310029
Received 22 October 2008 **received in revised form** 9 March 2009, **accepted** 3 June 2009

Abstract The growth characteristics of different varieties of ryegrass (*Lolium L.*) and their ability to purify eutrophic water were studied using floating plant-beds. The results showed that twelve varieties of ryegrass grew well in the eutrophic water, and their purification efficiencies differed significantly ($p < 0. 05$). Removal rate of TN, TP, COD_{Mn} and BOD₅ in eutrophic water bodies were up to 73. 68%, 84. 69%, 87. 87%, 75. 85%, respectively. In addition, the pH decreased and DO increased in the eutrophic water bodies. The N and P accumulation in the aboveground plants in the indoor experiments were 46. 86~ 145. 25 mg m⁻² d⁻¹ and 11. 39~ 42. 74 mg m⁻² d⁻¹, respectively, and in the outdoor experiment were 61. 5~ 168. 2 mg m⁻² d⁻¹ and 11. 9~ 47. 2 mg m⁻² d⁻¹, respectively. There were obvious correlations between N and P accumulation in the plants and their biomass ($r \geq 0. 90$). However, there were significant differences between varieties ($p < 0. 05$), and the performance of Bond Angus 2 and Majr were the best for purifying eutrophic water.
Keywords *Lolium L.*; eutrophic water bodies; purification ability

1 引言 (Introduction)

随着人口的急剧膨胀和工农业的迅速发展, 大量生活污水和工农业废水所引起的水环境污染已

引起人们的普遍关注. 其中, 由过高 N、P 浓度所引起的水体富营养化一直是世界水污染中较为严重的问题, 也是我国水环境管理中的一个难题. 近年来, 由于水生植物在生长过程中, 需要吸收大量的

基金项目: 教育部科技研究重点项目 (No. 200705824); 浙江省科技局重点项目 (No. 2006C13059)
Supported by the Key Program from the Chinese Ministry of Education (No. 200705824) and the Key Project from Science and Technology Bureau of Zhejiang Province (No. 2006C13059)
作者简介: 胡绵好 (1976—), 男, 讲师, E-mail: yanket@gmail.com; * 通讯作者 (责任作者), E-mail: xyang581@yahoo.com
Biography: HU M ianhao (1976—), male, lecturer. E-mail: yanket@gmail.com; * **Corresponding author** E-mail: xyang581@yahoo.com
© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

氮、磷等营养元素, 并当其从水生生态系统移出时, 被吸收的营养物质随之被带走, 从而使水体中的氮、磷含量降低, 减轻水体富营养化程度. 因此, 利用植物来去除富营养化水体中的营养盐等物质的水体污染修复已经引起了国内外学术界的特别重视. Peterson等 (1996)研究发现, 在轻度氮、磷负荷的人工湿地处理系统中, 植物收割去除水体中的氮占人工湿地氮总去除量的 30%. 井艳文等 (2003)利用生态浮床植物技术修复水体中发现, 美人蕉对 TN 的吸收量为 $24\ 636\ \text{g}\cdot\text{m}^{-2}$, 对 P 的吸收量为 $3\ 11\ \text{g}\cdot\text{m}^{-2}$; 旱伞草对 TN 的吸收量为 $40\ 424\ \text{g}\cdot\text{m}^{-2}$, 对 P 的吸收量为 $5\ 12\ \text{g}\cdot\text{m}^{-2}$, 这些浮床植物对 TN、TP 等污染物的去除均有良好的效果. 但由于不同植物的生理特性不同, 净化富营养化水体的效果、收获物的用途或经济价值等不一样. 因此, 选择出适合环境特点, 具有较高净化能力, 又有一定经济价值的浮床 (湿地) 植物或植物组合是人工湿地或人工生物浮床要解决的关键问题之一.

黑麦草是一种经济价值较高的牧草, 具有茎叶繁茂、幼嫩多汁、产草量高、再生性强和适口性好特点, 为各种家畜所喜食, 是我国南方地区栽培的优良禾草. 目前, 有关黑麦草在冬季浮床和湿地系统中的应用及其与其它植物在净化水体方面的比较研究较多 (戴全裕等, 1993; 蒋跃平等, 2004; 劳善根等, 2005), 且其作为牧草在陆上种植时, 对不同黑麦草品种间差异的研究也已有报道 (王明蓉等, 2004; 舒健虹等, 2006), 但对不同黑麦草品种在净化水体方面的研究却鲜有报道. 因此, 本试验对不同黑麦草品种去除富营养化水体中的营养盐效果进行了比较研究, 以筛选出耐污能力强、净化效果好的黑麦草品种, 为进一步完善黑麦草在净化水体方面的应用研究提供科学的理论依据.

2 材料与方法 (Materials and methods)

2.1 试验材料及试验用水

本试验选用了 11 个多花黑麦草品种 (*Lolium multiflorum* Lam.) 和 1 个多年生黑麦草 (*Lolium perenne* Linn.) 作为实验材料. 11 个多花黑麦草品种分别为牧童、劲能、抗锈王、安格斯 1 号、邦德、安格斯 2 号、杰特、海湾、萨瑞、牧杰和沃土; 多年生黑麦草品种为冬牧 70. 根据黑麦草的生长特性, 本试验选择厚 0.7 cm、宽 1 m 的 PE 珍珠棉作为浮床载体. 根据室内外试验的不同需要, 将 PE 珍珠棉板裁

成直径为 30 cm 的圆板和 1 m × 1 m 的正方形板. 本试验研究所用富营养化水取自浙江大学华家池校区的华家池. 经测定, 供试水体水质指标主要见于表 1.

Table 1 Water quality in the tested waters mg L⁻¹					
TN	TP	COD _{Mn}	BOD ₅	DO	pH
6.20	0.65	9.83	5.64	3.14	7.72

2.2 试验方法

本试验分为室内静态试验和室外动态试验两部分. 试验前先将各黑麦草种在水中浸泡 5 h, 然后移至 30℃ 恒温箱中催芽 48 h 促其露白.

2.2.1 室内静态试验 本试验于 2006 年 11 月 24 日至 12 月 22 日在浙江大学华家池校区玻璃温室内进行, 试验期间室内外温度变化如图 1 所示. 将催芽后的黑麦草种均匀的撒播于铺好湿泥炭的圆形载体 (0.07 m²) 上, 再在其上覆盖 1 层泥炭 (5 cm 厚左右), 移至清水中育苗. 5 d 后, 将苗连同载体一起放入装有富营养化水 (18 L) 的红色塑料桶 (20 L) 中, 记录放入时苗高和根长, 并测定供试水体的水质 (原始值), 开始处理. 每隔 7 d 记录 1 次黑麦草的生长高度和根长, 同时对水样进行测定. 试验开始 14 d 后, 待黑麦草平均高度长至 20 cm 左右 (冬牧 70 除外), 每 7 d 取植物地上部样品称重, 烘干后磨细, 并称取 0.1 g 植物 (以干重计) 对其体内的氮磷含量进行分析. 试验共设 13 个处理, 每个处理 3 次重复, 无植物处理为对照 (CK).

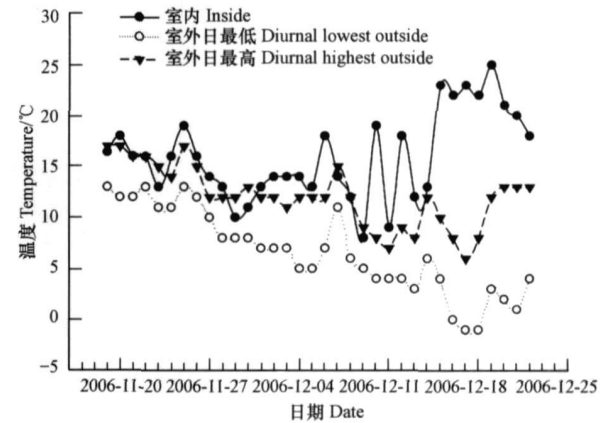


图 1 温室内、外的温度变化
Fig 1 Temperatures inside and outside the greenhouse

2.2.2 室外动态试验 本试验于 2006 年 11 月 19 日至 2007 年 5 月 1 日在浙江大学华家池校区富营

养化水体研究平台 (120°11'E, 30°16'N) 进行, 其间温度变化如表 2 所示. 将催芽后的黑麦草均匀的撒播于正方形载体 (1m²) 上, 均匀地覆上 2~3cm 厚的泥炭, 最后将其放入试验围隔 (25m²) 中. 当苗长出后, 开始对围隔中的各黑麦草的生长变化情况进行观测. 当植物生长到一定的高度 (35cm 左右), 进行刈割 (2~3 次). 对每次刈割的黑麦草, 进行称重, 烘干后用于植物体内氮、磷含量的分析. 试验设 12 处理, 每个处理 2 次重复, 无植物处理为对照 (CK).

表 2 杭州市 2006~2007 年冬季气温月变化情况

Table 2 Winter temperatures from 2006 to 2007 in Hangzhou

时间	平均气温 /℃				月最高温 /℃	月最低温 /℃
	上旬	中旬	下旬	月		
2006-11	18.6	14.7	12.1	15.2	28.4	7.3
2006-12	8.8	6.9	7.4	7.7	19.0	1.3
2007-01	4.8	5.0	6.0	5.3	16.2	-1.9
2007-02	10.6	10.1	11.0	10.5	25.8	-1.1
2007-03	10.9	8.9	17.9	12.7	32.8	1.4
2007-04	14.1	17.5	17.9	16.5	32.1	5.0

注: 以上数据来源于杭州市气象局 (2006-11~2007-4).

2.3 分析方法

为了使试验水中的净化效果与自然状态更符合, 室内试验不添加水量, 而是通过称水重来换算所观测指标的总量, 由此计算去除率. 这样就克服了添加水对植物吸收营养的影响. 参照葛滢等 (1999) 的方法计算去除率, 即:

$$\rho = (C_0 V_0 - C_i V_i) / (C_0 V_0) \times 100\%$$
 (1)

式中, C₀ 为初始时的浓度 (mg·L⁻¹, 下同), V₀ 为初始时的水体积 (L, 下同), C_i 为第 i 天的浓度, V_i 为第 i 天的水体积. 总氮 (TN) 经碱性过硫酸钾氧化后采用紫

外分光光度法分析; 总磷 (TP) 采用钼锑抗分光光度法分析; 化学需氧量 (COD) 采用高锰酸钾氧化法; 生化需氧量 (BOD) 和溶解氧 (DO) 采用 JPBJ-608 型便携式溶解氧分析仪测定; pH 采用 pH 计测定 (国家环保总局《水和废水监测分析方法》编委会, 2002).

植物体内的 TN、TP 含量测定: 先用浓 H₂SO₄-H₂O 对植物干样进行完全消煮后, 再分别采用奈氏比色法和钒钼黄比色法测定 (鲍士旦, 2000). 记录黑麦草的生长情况、株高、根长和生物量等.

所有数据采用 SPSS、Signapbt 9.0 等软件进行处理分析, 并对一些数据作了相关及回归分析 (黄文龙, 1994).

3 结果 (Results)

3.1 不同品种黑麦草在富营养化水体的生长情况

室内静态试验期间, 温室内温度基本保持在 10~27℃ 之间 (图 1), 适宜黑麦草的生长. 试验期间从各黑麦草的生长情况观察来看, 各品种从试验前的平均叶少、叶短和根系较少, 变为试验后的平均叶多、叶长和根系较多. 移植前, 除冬牧 70 外, 植株平均高度为 6.2cm, 根长为 2.8cm; 试验结束后, 植株平均高度达 23.7cm, 根长达 22cm. 然而不同品种间存在一定的差异. 其中, 以邦德、安格斯 2 号和牧杰植株高度最高, 其它各品种次之, 冬牧 70 生长最为缓慢; 根系以邦德和安格斯 2 号的长度最长, 海湾、牧杰和萨瑞次之, 冬牧 70 根系生长最为缓慢 (图 2). 室外试验期间, 杭州市月平均气温在 5.3~16.5℃ 之间, 最低温 -1.9℃, 最高温 32.8℃ (表 1).

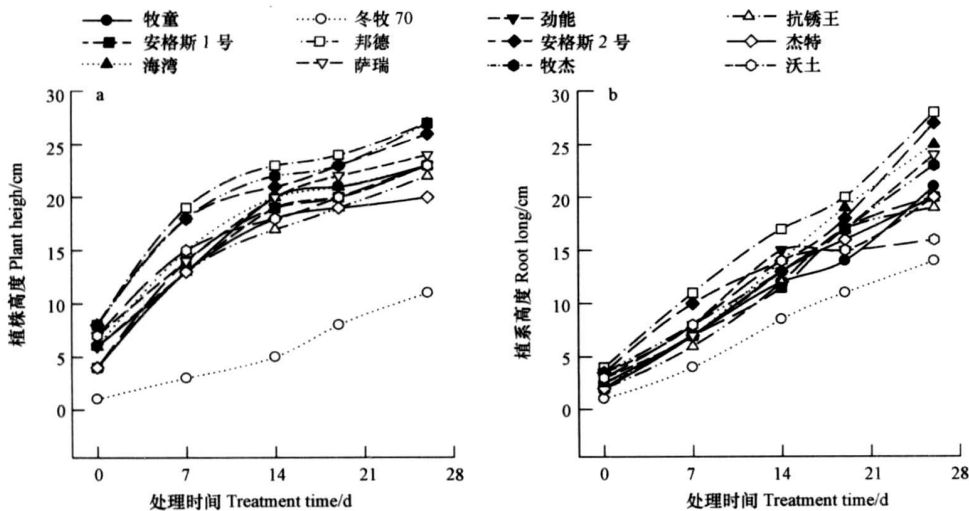


图 2 室内试验中不同品种黑麦草的生长情况

Fig. 2 The growth of different kinds of ryegrass in laboratory experiments

黑麦草在室外稳定生长后, 各品种都能安全越冬, 未发生叶片枯黄、死亡等现象, 且各品种均生长良好, 平均株高达 49.3 cm。其中, 以安格斯 2 号、邦德和牧杰的株高最高, 均达 55 cm 以上; 其次是海湾、沃土、杰特和萨瑞, 株高也达 50 cm 以上, 其余各品种也均在 45 cm 以上。但冬牧 70 的株高仅 30 cm, 这可能是由于冬牧 70 属多年生品种, 生长较一年生品种缓慢。

从室内和室外试验各品种黑麦草生长情况来看, 以邦德、安格斯 2 号和牧杰的生长情况最好, 其新芽生长速度较快, 生物量增值大, 叶片色泽鲜亮饱满, 根系发达。

3.2 不同品种黑麦草对富营养化水体氮、磷去除能力的比较

3.2.1 对富营养化水体中总氮、总磷的去除 室内

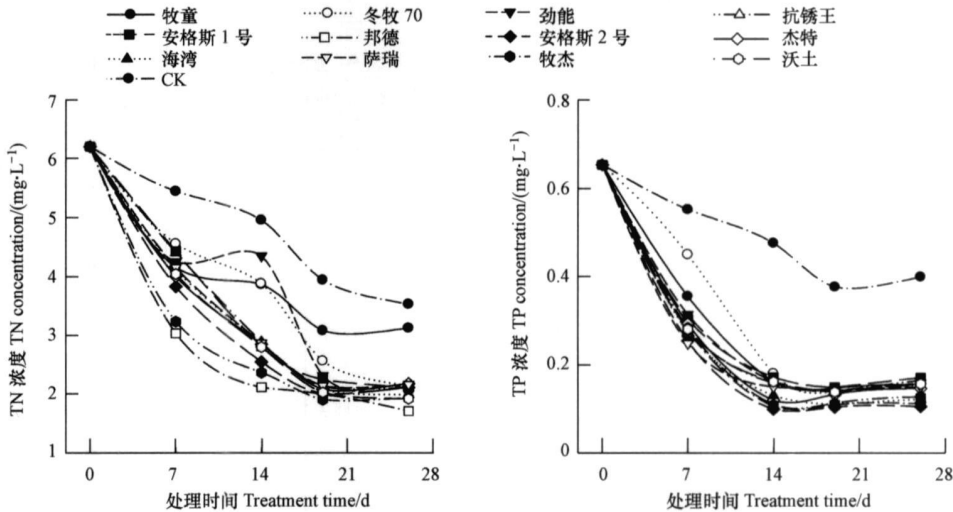


图 3 不同品种黑麦草处理富营养化水体中 TN、TP 的变化
Fig. 3 TN and TP in eutrophic water bodies treated with different varieties of ryegrass

3.2.2 不同品种黑麦草处理的 TN-t 曲线方程 利用试验所得的数据, 对水体总氮浓度和处理时间作回归分析, 可以得出不同品种黑麦草处理下的 TN-t 回归方程 (见表 3)。从表 3 可以看出, 随着处理时间延长, 水体中总氮浓度呈负指数形式衰减。回归方程的通式为:

$$y = ae^{-bx} \quad (a > 0, b > 0) \tag{2}$$

式中, y 为 TN 浓度值 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); x 为时间 (d)。其中, b 值的大小反映着各品种去除能力的差异, b 值越大, 去除能力越强。因此, 不同品种黑麦草的除氮能力依次为: 邦德 > 牧杰 > 安格斯 2 号 > 沃土 > 海湾 > 杰特 > 抗锈王 > 萨瑞 > 安格斯 1 号 > 冬牧 70 > 劲能 > 牧童。

试验不同品种黑麦草对富营养化水体中总氮和总磷的去除效果如图 3 所示。从图 3 可以看出, 不同品种黑麦草处理的富营养化水体中的总氮、总磷含量随着处理时间延长而降低。其中, 总氮的去除率在 51.95% ~ 73.68% 之间, 总磷的去除率在 74.99% ~ 84.69% 之间, 但不同品种间的去除效果存在一定的差异。同时, 不同品种黑麦草对水体中总氮、总磷的去除率均明显高于无植物 (CK) 处理。此结果表明, 有植物处理的富营养化水体脱氮除磷效果要比无植物要好。从图 3 中还可知, 试验处理 14 d 后, 黑麦草去除水体中氮、磷的速率变得较为缓慢。这一方面可能是由于水体中氮、磷含量过低或温度的变化较大, 致使植物生长缓慢; 另一方面可能是由于对黑麦草的刈割引起的。

表 3 不同品种黑麦草处理的 TN-t 回归方程
Table 3 TN-t regression equation in eutrophic water bodies treated with different varieties of ryegrass

品种	回归方程	n	r	p	显著性水平
牧童	$y = 5.8374e^{-0.03x}$	10	-0.9432	0.05	显著
冬牧 70	$y = 6.2088e^{-0.041x}$	10	-0.9886	0.05	显著
劲能	$y = 6.1487e^{-0.0405x}$	10	-0.9462	0.05	显著
抗锈王	$y = 6.1606e^{-0.0407x}$	10	-0.9884	0.05	显著
安格斯 1 号	$y = 6.1561e^{-0.0403x}$	10	-0.9890	0.05	显著
邦德	$y = 5.8541e^{-0.0646x}$	10	-0.9581	0.05	显著
安格斯 2 号	$y = 5.9909e^{-0.0539x}$	10	-0.9740	0.05	显著
杰特	$y = 6.0247e^{-0.0502x}$	10	-0.9801	0.05	显著
海湾	$y = 6.0973e^{-0.0518x}$	10	-0.9903	0.05	显著
萨瑞	$y = 6.0687e^{-0.0495x}$	10	-0.9847	0.05	显著
牧杰	$y = 5.8676e^{-0.0598x}$	10	-0.9598	0.05	显著
沃土	$y = 6.0894e^{-0.0533x}$	10	-0.9907	0.05	显著

3 2 3 不同品种黑麦草处理的 TP-*t* 曲线方程 利用试验所得的数据, 对水体总磷浓度和处理时间作回归分析, 得出各品种黑麦草生长下的 TP-*t* 回归方程 (见表 4)。从表 4 可以看出, 随着时间的延长, 水体中总磷浓度呈负指数形式衰减。回归方程的通式为:

$$y = a e^{-bx} \quad (a > 0 \quad b > 0) \quad (3)$$

式中, *y* 为 TP 浓度值 (mg L⁻¹); *x* 为时间 (d)。其中 *b* 值的大小同样反映着各品种去除能力的差异, *b* 值越大, 去除能力越强。因此, 不同品种黑麦草除磷能力依次为: 安格斯 2 号 > 邦德 > 牧杰 > 海湾 > 杰特 > 萨瑞 > 沃土 > 抗锈王 > 劲能 > 安格斯 1 号 > 牧童 > 冬牧 70

表 4 不同黑麦草品种处理的 TP-*t* 回归方程
Table 4 TP-*t* regression equation in eutrophic water bodies treated with different varieties of ryegrass

品种	回归方程	<i>n</i>	<i>R</i>	<i>p</i>	显著性水平
牧童	$y = 0.6405 e^{-0.0797x}$	10	-0.9780	0.05	显著
冬牧 70	$y = 0.6632 e^{-0.0726x}$	10	-0.9757	0.05	显著
劲能	$y = 0.6327 e^{-0.0838x}$	10	-0.9710	0.05	显著
抗锈王	$y = 0.6260 e^{-0.0867x}$	10	-0.9582	0.05	显著
安格斯 1 号	$y = 0.6265 e^{-0.0804x}$	10	-0.9620	0.05	显著
邦德	$y = 0.6425 e^{-0.1088x}$	10	-0.9822	0.05	显著
安格斯 2 号	$y = 0.6417 e^{-0.1170x}$	10	-0.9817	0.05	显著
杰特	$y = 0.6357 e^{-0.0956x}$	10	-0.9671	0.05	显著
海湾	$y = 0.638 e^{-0.1031x}$	10	-0.9803	0.05	显著
萨瑞	$y = 0.6240 e^{-0.0943x}$	10	-0.9540	0.05	显著
牧杰	$y = 0.6406 e^{-0.1047x}$	10	-0.9763	0.05	显著
沃土	$y = 0.6271 e^{-0.0876x}$	10	-0.9633	0.05	显著

3 3 不同品种黑麦草体内氮、磷积累量

室内试验中, 不同品种黑麦草地上部分 N、P 积累量存在显著差异 (表 5)。邦德、牧杰和安格斯 2 号地上部 N 积累量 (分别为 145.25、145.11 和 143.39 mg m⁻² d⁻¹) 要明显高于其它品种, 而冬牧 70 地上部分 N 积累量 (为 46.86 mg m⁻² d⁻¹) 较低。同时还发现, 安格斯 2 号、邦德和牧杰地上部分 P 的积累量

(分别为 42.74、42.68 和 38.30 mg m⁻² d⁻¹) 也较其它品种要高, 冬牧 70 地上部分 P 的积累量 (11.39 mg m⁻² d⁻¹) 较低。室外试验中, 不同品种黑麦草体内 N 积累量以牧杰最高 (168.2 mg m⁻² d⁻¹), 安格斯 2 号与邦德次之, 分别达 159.4 mg m⁻² d⁻¹ 和 153.4 mg m⁻² d⁻¹, 而多年生黑麦草冬牧 70 为最低 (仅是 61.5 mg m⁻² d⁻¹) (表 6)。不同品种黑麦草体内 P 积累量中, 牧杰和安格斯 2 号较高, 分别达 47.2 mg m⁻² d⁻¹ 和 41.6 mg m⁻² d⁻¹, 邦德和萨瑞次之, 分别达 36.8 mg m⁻² d⁻¹ 和 35.2 mg m⁻² d⁻¹, 而冬牧 70 最低, 仅为 11.9 mg m⁻² d⁻¹。这可能由于品种间生长特性的差异所引起的。各植物的氮、磷积累量分别与生物量之间的相关关系 (*p* < 0.05) 见图 4 其中, 氮、磷积累量与生物量的相关系数分别为 0.91 和 0.90, 说明氮、磷积累量与生物量之间显著相关。

表 5 室内试验不同品种黑麦草地上部分的 N、P 积累量
Table 5 Above ground accumulation of nitrogen and phosphorus in different varieties of ryegrass in the indoor experiments

品种	植物地上部分 N、P 积累量 / (mg m ⁻² d ⁻¹)	
	Nitrogen	Phosphorus
牧童	102.96 ^{cd}	26.47 ^{cd}
冬牧 70	46.86 ^f	11.39 ^e
劲能	109.86 ^{bc}	27.48 ^{cd}
抗锈王	91.22 ^e	23.04 ^d
安格斯 1 号	100.41 ^d	26.98 ^{cd}
邦德	145.25 ^a	42.68 ^a
安格斯 2 号	143.39 ^a	42.74 ^a
杰特	88.71 ^e	23.37 ^{cd}
海湾	110.72 ^{bc}	30.87 ^{bc}
萨瑞	118.08 ^b	30.86 ^{bc}
牧杰	145.11 ^a	38.30 ^{ab}
沃土	113.79 ^b	31.20 ^{bc}

注: 每一行数字后面的不同的小写字母表示 Duncan 新复极差 *p* < 0.05 显著差异水平表

表 6 室外试验不同品种黑麦草地上部的 N、P 积累量
Table 6 Aboveground accumulation of nitrogen and phosphorus in different varieties of ryegrass in the outdoor experiments

品 种	氮浓度 / (mg g ⁻¹)	磷浓度 / (mg g ⁻¹)	N 积累量 / (mg m ⁻² d ⁻¹)	P 积累量 / (mg m ⁻² d ⁻¹)	总干物质质量 / (g m ⁻²)
牧童	38.50	6.92	138.6	24.9	583.1
冬牧 70	30.99	6.00	61.5	11.9	321.5
劲能	32.78	7.40	120.5	27.2	595.3
抗锈王	27.98	6.51	102.5	23.8	593.7
安格斯 1 号	31.96	6.98	124.0	27.1	628.5
邦德	31.24	7.50	153.4	36.8	795.3
安格斯 2 号	30.95	8.08	159.4	41.6	834.2
杰特	28.30	6.54	114.8	26.5	657.2
海湾	27.74	5.76	131.8	27.4	769.7
萨瑞	32.82	8.68	133.3	35.2	657.8
牧杰	29.52	8.28	168.2	47.2	922.8
沃土	34.82	8.95	131.0	33.7	609.4

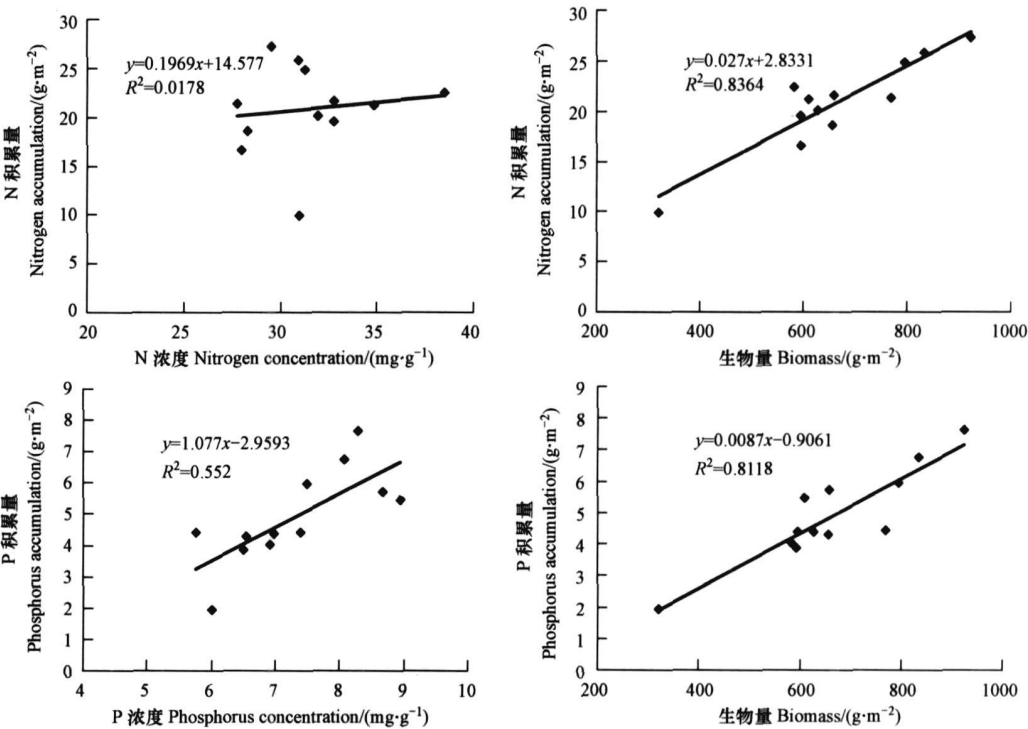


图 4 植物氮磷浓度、植物生物量与植物氮磷积累量的关系

Fig 4 Relationship between concentration of plant nitrogen and phosphorus biomass and accumulation of plant nitrogen and phosphorus

3 4 不同黑麦草处理对富营养化水体中 COD_{Mn}、BOD₅的影响

黑麦草处理富营养化水体中的 COD_{Mn}浓度变化较无植物处理明显, COD_{Mn}下降明显高于无植物处理 (CK). 其中, 以邦德、安格斯 2 号和萨瑞处理的富营养化水体中的 COD_{Mn}浓度下降得尤为明显, 其

COD_{Mn}浓度从 9.83 mg·L⁻¹分别降低到 1.19、1.39 和 2.14 mg·L⁻¹ (图 5a).

不同品种黑麦草处理的富营养化水体中的 BOD₅在各阶段均显著低于无植物处理. 处理 14d 后, 富营养化水体中的 BOD₅下降, 以邦德、安格斯 2

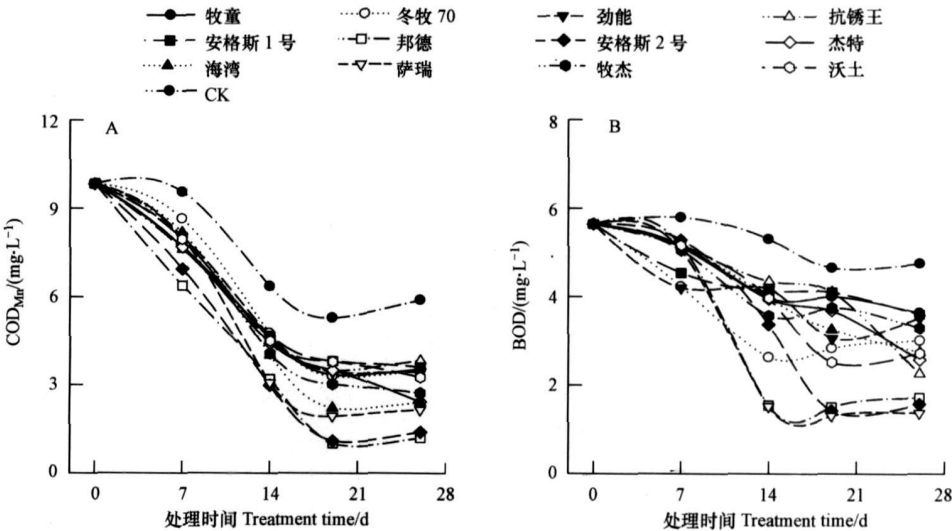


图 5 不同品种黑麦草处理对富营养化水体处理中 COD_{Mn}、BOD₅的影响

Fig 5 Effect of different varieties of ryegrass on COD_{Mn} and BOD₅ in eutrophic water bodies

号和萨瑞品种最为明显. 其中, 邦德和萨瑞处理的富营养化水体中 BOD_5 浓度从 $5.64\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 分别降至 $1.54\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $1.52\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 安格斯 2 号也降至 $3.26\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 其它品种处理的富营养化水体中 BOD_5 值也有一定程度的降低, 但降低幅度小于萨瑞、邦德和安格斯 2 号这 3 个品种 (图 5b).

3.5 不同黑麦草处理对富营养化水体中 pH、DO 的影响

7d 后, 不同品种黑麦草处理的富营养化水体中 pH 值降低较无植物处理明显, 并使富营养化水体中的 pH 值保持在 6.87 左右. 而无植物处理的水体中

pH 变化较小 (从 7.72 降到 7.5), 水体仍偏碱性. 各品种中又以安格斯 2 号、海湾和牧杰处理的富营养化水体中 pH 下降最为明显 (图 6a).

21d 后, 不同品种黑麦草处理的富营养化水体中的 DO 值升到最高 (从 $3.14\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 上升到 $7.17\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 随后有所下降, 但仍较无植物处理的要高. 其中, 以邦德、牧杰和抗锈王处理的富营养化水体中 DO 上升最为明显 (图 6b); 而无植物处理的富营养化水体中的 DO 浓度上升不明显, 且在处理后期还出现下降趋势.

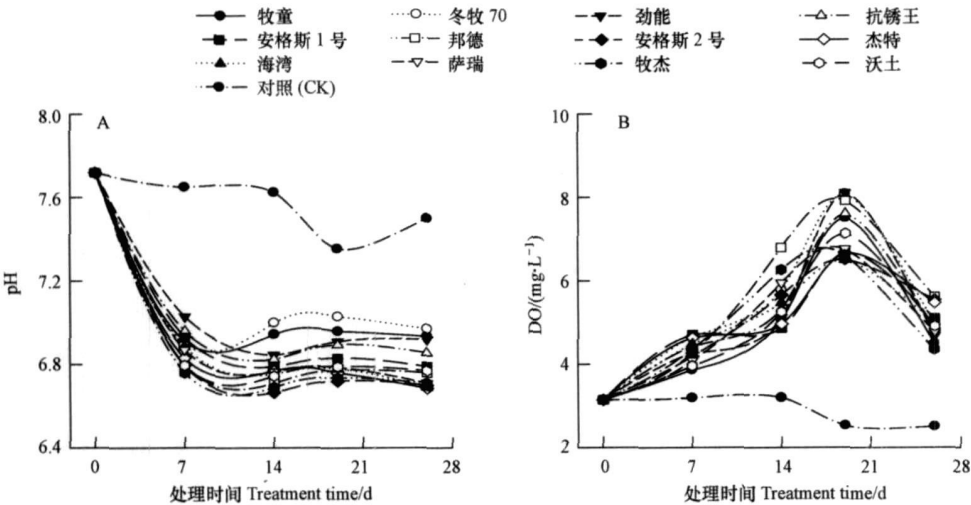


图 6 不同品种黑麦草处理对富营养化水体处理中 pH、DO 的影响
Fig 6 Effect of different varieties of ryegrass on pH and DO in eutrophic water bodies

4 讨论 (Discussion)

4.1 富营养化水体中不同品种黑麦草的生长情况

不同植物的生长发育均有适宜的温度范围, 这对植物吸收矿质营养及净化水体显得尤为重要 (Hanlin *et al.*, 1999). 如果温度过高将导致许多植物同化能力的下降 (Portis *et al.*, 2003; Salucci *et al.*, 2004), 生长减缓, 产量降低; 而温度过低又会影响植物体内水分黏度及膜透性等生理特性, 从而影响植物的代谢过程, 还会限制水体中微生物的活性 (Hobbie *et al.*, 2000; Hobbie *et al.*, 2002). 黑麦草在 10°C 左右能较好地生长, 27°C 以下为生长最适宜温度, 35°C 以上则生长不良甚至死亡. 室内静态试验期间, 温室内温度基本保持在 $10\sim 27^{\circ}\text{C}$ 之间 (图 1), 适宜黑麦草的生长. 而室外试验期间, 平均

气温在 $4.8\sim 17.9^{\circ}\text{C}$ 之间变化. 其中, 在 2007 年 1 月份和 2 月份出现了零度以下温度, 月最低气温分别为 -1.9°C 和 -1.1°C ; 而在 2007 年 3 月份和 4 月份, 出现了 30°C 以上的天气, 月最高气温分别为 32.8°C 和 32.1°C , 各品种黑麦草都安全度过了杭州的冬季, 没有出现叶片枯黄和死亡等现象. 在整个试验期间各品种黑麦草叶片色泽饱满鲜亮, 生长良好, 平均株高达 49.3 cm ; 除多年生黑麦草品种冬牧 70 外, 其余各品种在 2007 年 4 月份均开始开花结籽, 正常完成自己的生育期. 因此, 在亚热带、温带等冬季低温地区, 黑麦草不仅能有效地用于污水的净化, 还实现了植物净化污水系统的周年稳定的运行. 本试验还发现, 无论是室内静态试验, 还是室外动态试验, 均以邦德、安格斯 2 号和牧杰 3 个品种生长最好, 其生长速度快, 生物量增值大.

4.2 不同品种黑麦草对富营养化水体中氮、磷的去除效果

水生植物在其生长过程中需要吸收大量的氮、磷等营养元素, 并当其从水生生态系统移出时可将吸收的营养物质随之带走, 从而使水体中的氮、磷含量降低, 减轻水体的富营养化程度 (Mungur *et al.*, 1997; Zhu *et al.*, 1998). 因此, 通过水生植物净化污水是一项经济有效且又环保的新方法. 本研究表明, 不同品种黑麦草处理的富营养化水体中总氮、总磷含量明显比无植物处理的要低, 总氮的去除率高达 73.68%, 总磷的去除率高达 84.69%. 但不同植物或同一植物的不同品种对营养盐的吸收和水体净化效果差异较大 (童昌华等, 2003). 本研究中不同品种黑麦草去除富营养化水体中氮的能力大小依次为: 邦德 > 牧杰 > 安格斯 2 号 > 沃土 > 海湾 > 杰特 > 抗锈王 > 萨瑞 > 安格斯 1 号 > 冬牧 70 > 劲能 > 牧童; 去除磷能力的大小依次: 安格斯 2 号 > 邦德 > 牧杰 > 海湾 > 杰特 > 萨瑞 > 沃土 > 抗锈王 > 劲能 > 安格斯 1 号 > 牧童 > 冬牧 70. 研究还发现, 处理 14d 后, 黑麦草去除水体中氮、磷的速率变得较为缓慢 (图 3). 这一方面可能是由于水体中氮、磷含量过低或温度的变化较大, 致使植物生长缓慢; 另一方面可能是由于对黑麦草的刈割所引起的. 牛晓音等 (2004) 的研究也表明, 对黑麦草刈割强度过大, 不利于黑麦草体内氮、磷的积累, 这也可能造成水体中的氮、磷去除缓慢.

植物体内的氮、磷浓度能够反映出该种植物对氮、磷的吸收能力. 本试验研究发现, 12 个黑麦草品种无论在室内试验, 还是室外试验中, 均以邦德、安格斯 2 号和牧杰 3 个品种地上部氮、磷的积累量为最高, 这说明这 3 个品种对氮、磷具有较强的吸收能力. 室内试验黑麦草各品种体内的 N、P 积累量与室外试验植物体内 N、P 积累量基本吻合, 积累量较高的几个品种基本相同, 但体内 N、P 的积累量高低排序有一定变化. 室内试验中, 体内的 N 积累量高低顺序为: 邦德 > 牧杰 > 格斯 2 号; 而室外试验中则是牧杰 > 格斯 2 号 > 邦德. P 积累量在室内试验植物体内的高低顺序为: 安格斯 2 号 > 邦德 > 牧杰, 而室外试验则为牧杰 > 安格斯 2 号 > 邦德. 这可能是因为植物在室内和室外的生长时间和生长环境的差异所引起, 从而导致了它们的氮、磷含量、生物量和干物质的差异. 但总体来说, 邦德、安格斯 2 号和牧杰这 3 个品种在 N、P 积累方面较其它品种优良. 同

时, 通过室内静态和室外动态试验的比较发现, 室外试验植物体内 N 的积累量较室内植物要高, 但 P 的积累量则并出现这种现象. 这一方面可能因为室外试验中黑麦草处理时间长; 另一方面是室外试验的水体处于一个动态的平衡状态, 水体中营养盐在一个不断地交换状态, 因此, 植物可以吸收并积累较多的 N 素营养. 而室内试验植物生长在一个静态环境中, 随着处理时间的延长, 水体中营养盐不断降低, 最后导致植物在该系统中由于营养的缺乏而发黄、早衰, 甚至死亡. 在室外试验中, 水体偏碱性 (pH 在 7.39~7.9 左右), 这样的环境不利于水体中磷的释放; 但在室内试验中, 水体呈弱酸性 (pH 6.8 左右), 这促进了与钙等元素结合的磷的释放, 从而植物对磷吸收量增加, 致使室内有些植物体内 P 的积累量较室外的植物高. 本试验还发现, 植物的生物量与植物体内氮、磷积累量的相关性好于体内浓度, 因而可以直接通过生物量来评价它们对氮、磷的去除作用. 蒋跃平等 (2004) 在对人工湿地中 21 种植物的研究也得出同样的结果.

4.3 不同品种黑麦草处理对富营养化水体中 COD_{Mn} 、BOD、pH 和 DO 的影响

化学需氧量 (COD) 反映了水中受还原性物质 (包括有机物、亚硝酸盐、亚铁盐和硫化物等) 污染的程度. 生化需氧量 (BOD) 反映了水中的某些可氧化物质 (主要是有机物) 被微生物分解, 此生物化学过程中消耗溶解氧的量. 有机物在水体中分解要消耗大量的溶解氧, 从而破坏水体中氧的平衡, 使水质恶化, 最终导致鱼类及其它水生生物因缺氧而死亡. 本试验结果表明, 黑麦草处理的富营养化水体中 COD_{Mn} 和 BOD_5 的去除率分别达 87.87%, 75.85%, 但品种间差异性较为明显, 其中以邦德、安格斯 2 号和萨瑞 3 个品种对富营养化水体中 COD_{Mn} 和 BOD_5 去除效果最好. 但试验还发现, 在处理后期富营养化水体中的 COD_{Mn} 和 BOD_5 有所上升. 这一方面由于覆盖泥炭在多次取样中的不断掉入水中, 另一方面可能由于植物在生长过程中一些老根死亡, 而新根生长较为缓慢, 这些都会导致在试验后期水体中有机物上升. 因此, 在实际工程应用中, 应尽量避免人为的影响和及时地把处理的植物从水中带走, 以减少水体中有机物增加的现象, 从而达到水生植物对水体有机物去除的最佳效果.

水体 pH 主要受水中 CO_2 含量的控制, 而在富营养化水体中, 氧和 CO_2 含量主要受生物过程的控

制. 本试验研究表明, 用黑麦草处理的富营养化水体中 pH 值从 7.72 降低至 6.87, 且不同品种间变化很明显; 而无植物处理的富营养化水体中 pH 值变化不大 (基本在 7.5 左右). 这一方面可能是由于黑麦草根系及大量微生物分泌了某些有机酸和水体中的 NH_4^+-N 被植物吸收所致; 另一方面可能是由于黑麦草抑制了藻类的生长, 因为藻种群密度的增加会导致水体中 pH 升高 (刘春光等, 2005). 而无植物处理的富营养化水体中微生物数量有限, 再加上藻类的生长, 最终致使水体中的 pH 变化不明显, 即在处理期间水体仍呈碱性状态.

水中溶解氧 (DO) 含量的高低主要取决于水上植物的生长活动 (童昌华等, 2004). 本试验结果表明, 黑麦草处理的富营养化水体中 DO 高达 $7.17 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 且不同品种的处理又以邦德、牧杰和抗锈王对水体的增氧效果最为明显 (图 6b). 而无植物处理的富营养化水体中 DO 却为 $3.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 这一方面是由于水体中有机物在好氧微生物的作用下要消耗水体中氧, 而水体表面与大气的中氧气交换扩散较少, 从而导致对照水中的溶解氧降低. 另一方面在有植物处理的水体中, 由于植物的光合作用要释放氧气, 并通过一些通气组织将这些氧气输送到根系, 导致使水体中溶解氧增加. 试验还发现, 在处理后期, 黑麦草和无植物处理的富营养化水体中 DO 浓度均有所下降, 但黑麦草处理的富营养化水体中的 DO 仍比无植物处理的要高. 这可能是由于在后期黑麦草被刈割, 其生长减弱, 植物光合作用也随之下降, 植物通过根系输送到水体中的氧就减少, 同时, 水体微生物分解有机物仍需要大量的氧. 因此, 致使后期水体中的 DO 明显下降.

5 结论 (Conclusions)

1) 无论是室内静态试验, 还是室外动态试验, 生长于富营养化水体中的 12 个黑麦草品种以邦德、安格斯 2 号和牧杰 3 个品种生长最好, 生长速度快且生物量大.

2) 黑麦草对 TN 和 TP 具有明显的去除效果, 其去除率分别达 73.68% 和 84.69%. 不同黑麦草品种间存在一定的差异, 其去除富营养化水体中氮的能力大小依次为: 邦德 > 牧杰 > 安格斯 2 号 > 沃土 > 海湾 > 杰特 > 抗锈王 > 萨瑞 > 安格斯 1 号 > 冬牧 70 > 劲能 > 牧童; 磷能力的大小依次: 安格斯 2 号 > 邦德 > 牧杰 > 海湾 > 杰特 > 萨瑞 > 沃土 > 抗锈王

> 劲能 > 安格斯 1 号 > 牧童 > 冬牧 70 不同品种黑麦草体内 N、P 含量以邦德、安格斯 2 号和牧杰最高. 不同品种黑麦草处理的富营养化水体中 COD_{Mn} 、 BOD_5 下降以邦德、安格斯 2 号和萨瑞处理的尤为明显; pH 下降最为明显的是安格斯 2 号、海湾和牧杰处理; 而 DO 上升的最为明显是邦德、牧杰和抗锈王处理.

3) 植物的生物量与植物体内氮、磷积累量之间显著相关, 可以直接通过生物量来评价它们对氮、磷的去除作用.

责任作者简介: 杨肖娥 (1958—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事污染环境生物修复、植物逆境营养生理、植物营养环境生态等方面的研究.

参考文献 (References):

- 戴全裕, 陈钊. 1993 多花黑麦草对啤酒废水净化功能的研究 [J]. 应用生态学报, 4(3): 334—337
- Dai Q Y, Cheng Z. 1993. Purification of beer wastewater by *Lolium multiflorum* [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 4(3): 334—337 (in Chinese)
- 葛滢, 王晓月, 常杰. 1999. 不同程度富营养化水中植物净化能力比较研究 [J]. 环境科学学报, 19(6): 690—692
- Ge Y, Wang X Y, Chang J. 1999. Comparative studies on the purification ability of plants in different degree eutrophic water [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 19(6): 690—692 (in Chinese)
- 国家环保总局水和废水监测分析方法编委会. 2002 水和废水监测分析方法 (第 4 版) [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 104—280
- State Environmental Protection Administration 《Monitor Water and Wastewater Analysis》Editorial Board. 2002. The analysis methods of Water and Wastewater Monitoring (4th edition) [M]. Beijing: Chinese Environmental Science Press, 104—280 (in Chinese)
- 黄文龙. 1994. 沉水植物在治理滇池草海污染中的作用 [J]. 植物资源与环境, 3(4): 29—33
- Huang W L. 1994. The effect of using submerged vegetation for the pollution treatment of Dianchi Caohai Lake [J]. Journal of Plant Resource and Environment, 3(4): 29—33 (in Chinese)
- Hamlin R L, Mills H A, Randle W M. 1999. Growth and nutrition of papyrus as influenced by N-form ratio and temperature [J]. Journal of Plant Nutrition, 22(10): 1637—1650
- Hobbie S E, Schimel D P, Tumber S E. 2000. Controls over carbon storage and turnover in high-latitude soils [J]. Global Change Biology, 6: 196—210
- Hobbie S E, Nadelhoffer K J, Hogberg P. 2002. A synthesis: The role of nutrients as constraints on carbon balances in boreal and arctic regions [J]. Plant Soil, 242: 163—170
- 井艳文, 胡秀琳, 许志兰, 等. 2003. 利用生物浮床技术进行水体修复研究与示范 [J]. 北京水利, (6): 18—19

- Jing Y W, Hu X L, Xu Z L, *et al*. 2003. Water repair research and demonstration using floating Rafts Technology [J]. Beijing Water Conservancy, (6): 18—19 (in Chinese)
- 蒋跃平, 葛滢, 岳春雷, 等. 2004 人工湿地植物对观赏水中氮磷去除的贡献 [J]. 生态学报, 24(8): 1718—1723
- Jiang Y P, Ge Y, Yue C L *et al*. 2004 Nutrient removal role of plants in constructed wetland on sightseeing water [J]. Acta Ecologica Sinica 24(8): 1718—1723 (in Chinese)
- 劳善根, 丁伟林, 崔绍荣, 等. 2005 多年生黑麦草对甲鱼养殖废水净化功能的工程应用研究 [J]. 上海交通大学学报 (农业科学版), 23(1): 41—45
- Lao S G, Ding W L, Cui S R. 2005. Engineering Application of the Treatment to Turtle-breeding Wastewater by Soilless Cultivated Ryegrass (*Lolium perenne*) [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University (Agricultural Science), Journal of Shanghai Jiaotong University (Agricultural Science): 41—45 (in Chinese)
- 刘春光, 金相灿, 孙凌, 等. 2005. pH 值对淡水藻类生长和种类变化的影响 [J]. 农业环境科学学报, 24(2): 294—298
- Liu C G, Jin X S, Sun L, *et al*. 2005. Effects of pH on growth and species changes of Algae in Freshwater [J]. Journal of Agro-Environment Science, 24(2): 294—298 (in Chinese)
- Mungur A S, Shute R B E, Revitt D, *et al*. 1997 An assessment of metal removal by a laboratory scale wetland [J]. Water Science and Technology, 35(5): 125—133
- 牛晓音, 葛滢, 常杰, 等. 2004 黑麦草在净化富营养化水的人工湿地生态工程中的作用 [J]. 湿地科学, 2(3): 202—208
- Niu X Y, Ge Y, Chang J *et al*. 2004 The Role of *Lolium perenne* in Constructed Wetland Ecological Engineering for Eutrophicate Water Purification [J]. Wetland Science, 2(3): 202—208 (in Chinese)
- 鲍士旦. 2000 土壤农化分析 (第 3 版) [M]. 北京: 中国农业出版社, 265—270
- Bao S D. 2000. Agricultural Chemical Analysis of Soil (3th edition) [M]. Beijing: China Agriculture Publishing House, 265—270 (in Chinese)
- Peterson S B, Teal J M. 1996. The role of plants in ecologically engineered wastewater treatment systems [J]. Ecological Engineering, 6 (1-3): 137—148
- Portis A R. 2003 Rubisco activase-rubisco's catalytic chaperone [J]. Photosynth Res, 75: 11—27
- Salvucci M E, Crafts-Brandner S J. 2004. Inhibition of photosynthesis by heat stress the activation state of rubisco as a limiting factor in photosynthesis [J]. Physioplant, 120: 179—186
- 舒健虹, 李辰琼, 尚以顺. 2006 多花黑麦草品种比较试验 [J]. 贵州畜牧兽医, 30(3): 8—9
- Shu J H, Li C Q, Chang Y S. 2006 Comparative test of Italian ryegrass varieties [J]. Guizhou Animal Husbandry and Veterinary Medicine, 30(3): 8—9 (in Chinese)
- 童昌华, 杨肖娥, 濮培民. 2003 低温季节水生植物对污染水体的净化效果研究 [J]. 水土保持学报, 17(2): 159—162
- Tong C H, Yang X E, Pu P M. 2003. Effect of hydrophytes on polluted water in low temperature season [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 17(2): 159—162 (in Chinese)
- 童昌华, 杨肖娥, 濮培民. 2004 富营养化水体的水生植物净化试验研究 [J]. 应用生态学报, 15(8): 1447—1450
- Tong C H, Yang X E, Pu P M. 2004 Purification of eutrophicated water by aquatic plant [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 15(8): 1447—1450 (in Chinese)
- 王明蓉, 王松, 罗富成. 2004 多花黑麦草品种比较试验 [J]. 牧草科学, 5: 15—17
- Wang M R, Wang S, Luo F C. 2004 Italian ryegrass varieties compare test [J]. Forage Science, 5: 15—17 (in Chinese)
- Zhu J, Zhu X Y. 1998. Treatment and utilization of wastewater in the Beijing Zoo by aquatic macrophytes system [J]. Ecological Engineering, 11(1-4): 101—110