

# 水淹对狗牙根营养繁殖植株的生理生态学效应

陈芳清<sup>1</sup>, 黄友珍<sup>1</sup>, 樊大勇<sup>2</sup>, 谢宗强<sup>2</sup>

(1. 三峡大学生态与环境科学研究中心, 湖北宜昌 443002; 2. 中国科学院植物研究所植被与环境变化重点实验室, 北京 100093)

**摘要:** 通过控制实验, 测定了经过水淹处理的狗牙根营养繁殖体在恢复阶段的光合作用及其相关的生理生化指标的变化。结果显示, 水淹时间对恢复阶段营养繁殖体的蒸腾作用和叶片温度的影响达到显著水平, 水淹深度对该时期营养繁殖体的光合作用、气孔导度、胞间二氧化碳浓度和叶片温度有显著影响。水淹还导致了恢复期间植株叶片光合色素含量的显著变化。经过水淹的植株的各类光合色素含量以及色素总含量都显著高于对照植株, 其中全淹处理的植株显著高于半淹处理的植株, 叶绿素 a 与叶绿素 b 的比例也是全淹处理的植株显著高于半淹处理的植株。结果表明狗牙根营养繁殖体具有较强的恢复生长和生理活动的的能力, 是一种适宜于水电工程库区消落带生态恢复的物种。

**关键词:** 狗牙根; 营养繁殖体; 光合作用; 蒸腾作用; 水淹

**中图分类号:** Q945.79 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3142(2010)04-0488-05

## Ecophysiological responses of vegetative propagule of *Cynodon dactylon* to simulated summer flooding

CHEN Fang-Qing<sup>1</sup>, HUANG You-Zhen<sup>1</sup>,  
FAN Da-Yong<sup>2</sup>, XIE Zong-Qiang<sup>2</sup>

(1. Center of Ecology and Environmental Science, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China)

**Abstract:** The ecophysiological effect of summer flooding on vegetative propagules of *C. dactylon* was uncovered through control experiments and its photosynthesis and other related physiological parameters were determined. Results showed that vegetative propagules of *C. dactylon* fell into dormancy during summer when stressed by summer flooding. Flooding duration had a significant effect on transpiration and leaf temperature of the recovering vegetative propagules meanwhile flooding depth significantly affected its photosynthesis, stomatal conductance, intercellular CO<sub>2</sub> concentration and leaf temperature. Simulated summer flooding also resulted in the significant change in photosynthetic pigment content. The photosynthetic pigment content of flooded vegetative propagules was higher than that of controls, so was the fully submerged plants than the half submerged plants. The ratio of Chla to Chlb also increased with the increase of flooding depth. It indicated that vegetative propagule of *C. dactylon* had a good ability to recover growth and physiological activity and was a good species that could be used in the ecological restoration of hydro-fluctuation belt in hydropower projects.

**Key words:** *Cynodon dactylon*; vegetative propagule; photosynthesis; transpiration; flooding

收稿日期: 2008-10-10 修回日期: 2009-12-30

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07104-003-03-3)[Supported by the Special Fund for National Major Program of Controlling and Treating of Water Pollution(2008ZX07104-003-03-3)]

作者简介: 陈芳清(1963-), 男, 江西省清江县人, 博士, 教授, 从事植物生态学和恢复生态学的研究, E-mail: fqchen@ctgu.edu.cn.

水淹会显著改变植物生长的环境条件,影响植物的生理生态学特性(Mielke等,2003;Yordanova等,2003)。现有研究表明,对于一些水淹适应能力低的物种而言,水淹会引起植株叶片叶绿素降解(衣英华等,2006;薛艳红等,2007;Close & Davidson,2003),光合能力显著降低,气孔关闭,蒸腾速率也随之下降(Anella & Whitlow,2000;Malik等,2001)。此外植物体还会发生可溶性蛋白与淀粉含量降低、丙二醛积累、保护酶活性升高等生化变化(Yordanova等,2004;Pezeshki,2001;陈芳清等,2008)。而对于耐淹植物,除了在形态学上通过产生不定根、通气组织和植株增高等变化外(Chen & Xie,2007;沙伟等,2006),其生理学的特征明显不同于不耐淹植物(Parolin,2001;Islam & MacDonald,2004)。耐淹植物的光合能力受水淹影响较小(陈芳清等,2008a;衣英华等,2006),有些植物甚至在水淹条件下,光合作用会显著增加,与此同时蒸腾速率也显著增加(Glaze等,2004)。另外,水淹结束后,耐淹植物的光合能力和生长恢复极快(陈芳清等,2008b;Islam & MacDonald,2004)。

狗牙根(*Cynodon dactylon*)是长江流域河流河岸带分布最为广的草本植物之一,主要生长于河岸带中上部的河滩上。每年随着洪水季节来临,狗牙根都要经历较长时间的淹没,但是该物种在洪水之后仍能恢复其生长,显示出对水淹较强的适应能力。该物种同时还具有较强的耐旱能力,每年在秋冬季还要经受长期的干旱胁迫。大型水电工程成库后,库区的消落幅度和消落节律都将不同于原有河流。库区消落带面临着因植被退化与消失而成为“裸带”的威胁。消落带的生态恢复关系到水利工程的长期利用和库区生态环境的改善与社会经济的可持续发展。筛选具有耐水淹能力且能够通过营养繁殖维持种群稳定的物种是消落带生态恢复的关键问题之一(戴方喜等,2006)。本文通过设置水淹控制实验,测试狗牙根营养繁殖体的光合作用、蒸腾作用等生理指标的变化,以揭示狗牙根对水淹的适应能力与生理生态学适应机理。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究材料与实验地

2007年8月2日从长江河床上将狗牙根匍匐茎连根采回,剪成小段,每段各带有一个节,节上长

有5cm左右的根和7~10cm长的芽,种于塑料盆内(40cm×30cm×15cm),每盆8株,置于三峡大学生命科学楼五楼生态试验园内(111°18.642'E,30°43.443'N,海拔134m)。

### 1.2 试验设置

分别设置了2个控制实验:(1)不同淹水深度的控制实验。分别设置对照、半淹、全淹三个处理,每个处理重复4次,每个重复包含8株植物,其中半淹组控制水面高出土壤表面5cm左右,全淹组控制水位高于植株顶端10cm左右;(2)不同淹水时间的控制实验。分别设置对照、水淹15d、水淹30d、水淹45d等四个处理,每个处理重复4次,每个重复包含8株植物,所有水淹均为全淹。用于淹水的塑料盆规格为70cm×50cm×40cm。从8月25日起将不同淹水时间的处理按实验设计分批淹水,10月5日淹水结束,将实验材料同时取出进行恢复生长。11月1日进行生理与生化指标的测定。

### 1.3 光合及相关生理与生化指标的测定

采用LI-6400便携式光合仪标准叶室,在PAR(光合有效辐射,红蓝光源)1000 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ,流量500 $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$ ,固定温度22 $^{\circ}\text{C}$ 条件下进行光合速率及相关生理指标测定。所有处理都选植株第三片叶进行测定,每个处理重复测定5株植株。同时采取植株上与光合作用测定位置相同位置的叶片进行测定光合色素。每个处理取5个样重复测定。

### 1.4 数据分析

所有数据采用Microsoft Excel工作表格记录,建立试验数据库,用SPSS软件(13.0)进行数据分析,分别以各试验因子为自变量,测试指标为因变量进行差异显著性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 水淹对植株叶绿素含量的影响

水淹胁迫解除后,各处理的植株均能快速恢复生长。水淹对恢复期间植株的光合色素合成有显著促进作用(表1)。水淹处理过的植株经恢复后,其叶片叶绿素a、叶绿素b、类胡萝卜素以及叶绿素a、b的总含量都显著高于对照植株( $P<0.01$ )。且各种色素的含量大体都随着水淹时间的延长而增加。但叶绿素a与叶绿素b的比值,叶绿素与类胡萝卜素的比值在各处理间无显著差异( $P>0.05$ )。

淹水深度对恢复阶段植株叶片的叶绿素a、叶

绿素 b、类胡萝卜素以及叶绿素 a, b 的总含量有极显著的差异 ( $P < 0.01$ )。其中全淹组植株的各种光合色素含量显著高于其它两组, 对照组与半淹组的植株之间无差异; 全淹组植株的叶绿素 a 与叶绿素

b 的比值显著高于其它两组植株, 而对照组植株又显著高于半淹组植株; 叶绿素与类胡萝卜素的比值在各水淹处理之间无显著差异 (表 2)。

上述结果表明, 在试验水淹时间和水淹深度范

表 1 恢复后不同淹水时间植株叶绿素含量方差分析结果

Table 1 Descriptives and ANOVA results of different water-logging times on the chlorophyll and carotenoid contents of *Cynodon dactylon* plants after regrowth

| 淹水时间<br>Flooding time | 叶绿素 a<br>Chla (mg/g)<br>Mean±SE | 叶绿素 b<br>Chlb (mg/g)<br>Mean±SE | 叶绿素 a+b<br>Chla+b (mg/g)<br>Mean±SE | 类胡萝卜素<br>Car (mg/g)<br>Mean±SE | 叶绿素 a/b<br>Chla/Chlb<br>Mean±SE | 叶绿素/类胡萝卜素<br>Chl/Car<br>Mean±SE |
|-----------------------|---------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 对照 Control            | 1.47±0.16                       | 0.32±0.03                       | 1.79±0.19                           | 0.36±0.04                      | 4.66±0.17                       | 5.02±0.23                       |
| 40 d                  | 2.29±0.11*                      | 0.46±0.02*                      | 2.75±0.13*                          | 0.56±0.03*                     | 4.80±0.15                       | 4.86±0.02                       |
| 20 d                  | 2.32±0.15*                      | 0.46±0.03*                      | 2.78±0.17*                          | 0.57±0.03*                     | 5.04±0.10                       | 4.85±0.03                       |
| 10 d                  | 1.99±0.11*                      | 0.41±0.02*                      | 2.37±0.12*                          | 0.51±0.03*                     | 4.98±0.04                       | 4.88±0.04                       |
| Total                 | df=3, F=8.86<br>P=0.001         | df=3, F=7.23<br>P=0.003         | df=3, F=8.76<br>P=0.001             | df=3, F=9.062<br>P=0.001       | df=3, F=1.88<br>P=0.174         | df=3, F=0.45<br>P=0.721         |

\* 表示差异显著水平在 0.05 以上; \*\* 表示差异显著水平在 0.01 以上。下同。

\*  $P < 0.05$ ; \*\*  $P < 0.01$ . The same below.

表 2 恢复后不同淹水深度植株叶绿素含量方差分析结果

Table 2 Descriptives and ANOVA results of different water-logging depths on the chlorophyll and carotenoid contents of *Cynodon dactylon* plants after regrowth

| 淹水深度<br>Flooding depth | 叶绿素 a<br>Chl a (mg·g <sup>-1</sup> )<br>Mean±SE | 叶绿素 b<br>Chl b (mg·g <sup>-1</sup> )<br>Mean±SE | 叶绿素 a+b<br>Chl a+b (mg·g <sup>-1</sup> )<br>Mean±SE | 类胡萝卜素<br>Car (mg·g <sup>-1</sup> )<br>Mean±SE | 叶绿素 a/叶绿素 b<br>Chl a/Chl b<br>Mean±SE | 叶绿素/类胡萝卜素<br>Chl/Car<br>Mean±SE |
|------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------|
| 对照 Control             | 1.47±0.16                                       | 0.32±0.03                                       | 1.79±0.19                                           | 0.36±0.04                                     | 4.66±0.17                             | 5.02±0.23                       |
| 半淹 Half flooding       | 1.39±0.02                                       | 0.31±0.01                                       | 1.70±0.03                                           | 0.34±0.00                                     | 4.47±0.12                             | 4.99±0.06                       |
| 全淹 Submersion          | 2.29±0.11*                                      | 0.46±0.03*                                      | 2.75±0.13**                                         | 0.56±0.03*                                    | 4.80±0.04*                            | 4.88±0.02                       |
| Total                  | df=2; F=20.21<br>P=0.000                        | df=2; F=11.94<br>P=0.001                        | df=2; F=18.92<br>P=0.000                            | df=2; F=18.23<br>P=0.000                      | df=2; F=4.24<br>P=0.04                | df=2; F=0.30<br>P=0.75          |

表 3 恢复后不同淹水时间植株光合强度方差分析结果

Table 3 Descriptives and ANOVA result of different water-logging times on the photosynthetic characteristics and related indicators of *Cynodon dactylon* plants after regrowth

| 水淹时间<br>Flooding duration | 最大净光合速率<br>Pmax (μmol·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> )<br>Mean±SE | 气孔导度<br>Gs (mol·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> )<br>Mean±SE | 胞间 CO <sub>2</sub> 浓度<br>Ci (μmol·mol <sup>-1</sup> )<br>Mean±SE | 叶片温度<br>Tleaf (°C)<br>Mean±SE | 蒸腾速率<br>Tr (mmol·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> )<br>Mean±SE |
|---------------------------|---------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|-------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| 对照 Control                | 13.84±0.73                                                          | 0.12±0.01                                                     | 230.40±9.75                                                      | 24.39±0.12                    | 2.11±0.20                                                      |
| 45 d                      | 16.90±0.93                                                          | 0.15±0.01                                                     | 202.60±9.80                                                      | 23.44±0.17*                   | 2.93±0.21**                                                    |
| 30 d                      | 16.60±0.67                                                          | 0.15±0.00                                                     | 209.60±17.11                                                     | 22.80±0.26*                   | 2.55±0.26*                                                     |
| 15 d                      | 16.60±0.92                                                          | 0.15±0.01                                                     | 203.60±12.68                                                     | 23.35±0.24*                   | 2.91±0.06**                                                    |
| Total                     | df=2, F=3.07<br>P=0.058                                             | df=2, F=2.13<br>P=0.131                                       | df=2, F=1.04<br>P=0.402                                          | df=2, F=10.23<br>P=0.001      | df=2, F=3.99<br>P=0.027                                        |

围内, 水淹有利于恢复阶段植株叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素 a, b、类胡萝卜素等光合色素的合成, 且随着水淹深度的增加而增加。水淹还能提高植株叶片叶绿素 a 与叶绿素 b 的比值。

2.2 水淹对植株光合作用等生理活动的影响

不同水淹时间处理对恢复阶段植株的叶片气孔

气体交换有着较大影响 (表 3)。虽然水淹时间对光合作用恢复的影响没有达到显著水平, 各水淹处理之间的净光合速率和气孔导度均无大的差异, 但是却都明显高于对照植株, 胞间 CO<sub>2</sub> 浓度低于对照, 而叶片温度和蒸腾速率显著高于对照植株。

水淹深度对恢复阶段营养繁殖体植株的生理指

标都有较大影响(表 4)。其中净光合速率随着水淹深度的增加而显著增加,水淹处理植株的气孔导度显著高于对照植株,胞间 CO<sub>2</sub> 浓度和叶片温度显著低于对照,虽然环境因子对蒸腾速率的作用没有达到显著水平,但是仍明显高于对照。

上述结果表明,水淹对于生长恢复阶段植株生理活动的恢复有着较大影响,在试验所测试范围,植

株的光合作用和蒸腾作用都随着水淹时间和水淹深度的增加而增加,其它一些相关的生理指标也随之发生显著变化,如叶片温度下降、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度下降、气孔导度上升等。其中水淹时间对蒸腾作用和叶片温度的影响达到显著水平,而水淹深度对光合作用和气孔导度、叶片温度和胞间 CO<sub>2</sub> 浓度的影响达到显著水平。

表 4 恢复后不同淹水深度植株光合强度方差分析结果

Table 4 Descriptives and ANOVA results of different water-logging depths on the photosynthetic and related characteristics of *Cynodon dactylon* plants after regrowth

| 水淹程度<br>Flooding<br>degree | 最大净光合速率<br>P <sub>max</sub> (μmol · m <sup>-2</sup> · s <sup>-1</sup> )<br>Mean ± SE | 气孔导度<br>Gs (mol · m <sup>-2</sup> · s <sup>-1</sup> )<br>Mean ± SE | 胞间 CO <sub>2</sub> 浓度<br>Ci (μmol · mol <sup>-1</sup> )<br>Mean ± SE | 叶片温度<br>T <sub>leaf</sub> (°C)<br>Mean ± SE | 蒸腾速率<br>Tr (mmol · m <sup>-2</sup> · s <sup>-1</sup> )<br>Mean ± SE |
|----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| 对照 Control                 | 13.84 ± 0.73                                                                         | 0.12 ± 0.01                                                        | 230.40 ± 9.75                                                        | 24.39 ± 0.12                                | 2.11 ± 0.20                                                         |
| 半淹 Half flooding           | 13.20 ± 0.89                                                                         | 0.16 ± 0.01 *                                                      | 290.40 ± 21.27 *                                                     | 22.36 ± 0.63 *                              | 2.32 ± 0.26                                                         |
| 全淹 Submersion              | 16.90 ± 0.93 *                                                                       | 0.15 ± 0.01 *                                                      | 202.60 ± 9.80                                                        | 23.44 ± 0.17                                | 2.93 ± 0.21                                                         |
| Total                      | df=2, F=5.39<br>P=0.021                                                              | df=2, F=4.82<br>P=0.029                                            | df=2, F=9.39<br>P=0.004                                              | df=2, F=7.04<br>P=0.009                     | df=2, F=3.71<br>P=0.056                                             |

### 3 小结

植物受水淹后,植物叶片的叶绿素含量、类胡萝卜素含量一般会显著下降,叶绿素 a 与叶绿素 b 以及叶绿素与类胡萝卜素的比值会显著上升(Close & Davidson, 2003; Fernandez, 2006),植物的光合能力因此会明显下降,生物量显著减少(Yordanova, 2003)。长期全淹没的条件下,植株地上部还会死亡。但是一旦水淹胁迫解除,耐淹植物的生长与生理活动往往恢复极快,其生物量也能得到快速恢复,而对水淹敏感的植物则难以恢复其生活力(Pezeshki, 2001)。植物快速恢复其生理活动一方面表明了该物种对水淹具有较强的适应能力,另一方面反映了植物的“饥饿”效应。植物受水淹胁迫过程中,体内的可溶性糖含量急剧上升(陈芳清等, 2008a),因维持其生命力而消耗了大量的营养物质,植株处于“饥饿”状态,只有通过快速地生长来弥补营养不足。一些植物在受到各种环境胁迫后,在恢复期会出现“补偿生长”现象(赵威等, 2008),生理活动和生长速率比未受胁迫的植株活跃(严美玲等, 2007; 陈芳清等, 2008b)。

狗牙根受水淹后,其叶片大多都逐渐变黄枯死,生物量丧失。但当水淹胁迫解除后,其生长能快速恢复,营养繁殖体的光合作用、蒸腾作用等生理活动都随着水淹时间延长和水淹深度的增加而增加,有

些变化还达到显著水平。且受过水淹的植株光合能力反而超过对照植株。同时繁殖体叶片的各种光合色素含量以及光合色素总含量都随着水淹时间和水淹深度的增加而显著增加,各种色素含量比值的变化不显著。表明水淹没有抑制狗牙根营养繁殖体叶片光合色素的形成,反而起到促进作用。同时其光合作用结构体系也没有改变。一般植物叶片的上述两项比值约为 3 : 1(潘瑞炽等, 2004),但狗牙根叶片叶绿素含量与类胡萝卜素含量的比值大于 3 : 1,这可能是耐水淹植物的一个特性(陈芳清等, 2008b)。叶绿素含量与类胡萝卜素含量比值高可以提高叶绿素在光合色素中的相对含量,确保有足够的反应中心色素,进而提高光合能力。

消落带植被恢复与重建中所筛选的物种除了能存活外,还要求能产生繁殖体维持种群的稳定与发展。本实验中所有水淹处理植株的成活率均保持在 100%,表明该物种营养繁殖体对水淹有较强的适应能力,是一种良好的可用于消落带生态恢复的物种。水淹后狗牙根植株除产生一系列上述的生理变化以适应环境变化外,在形态学上也通过产生不定根、枝条伸长与植物生理活动的变化相协调。不定根的形成提高了植物露于空气中吸收 CO<sub>2</sub> 组织的总面积,促进根部氧气供应,抵御膜质过氧化作用,保持较高的活性氧清除能力(Malik 等, 2001; Maricle & Lee, 2002; Liang 等, 2003),维持根系活力。本实验仅模拟了 8~10 月的水淹。在进行应用的时候,必须结

合具体的水电工程的水位消落节律来开展水淹实验,研判其是否适于该工程库区消落带的生态治理。

### 参考文献:

- 潘瑞炽,王小菁,李娘辉. 2004. 植物生理学[M]. 北京:高等教育出版社:66—68
- Anella LB, Whitlow TH. 2000. Photosynthetic response to flooding of *Acer rubrum* seedlings from wet and dry sites[J]. *Am Midl Nat*, **143**:330—342
- Chen FQ(陈芳清), Guo CY(郭成圆), Wang CH(王传华), et al. 2008b. Effects of waterlogging on ecophysiological characteristics of *Salix variegata* seedlings(水淹对秋华柳幼苗生理生态特征的影响)[J]. *Chin J Appl Ecol*(应用生态学报), **19**:1 229—1 233
- Chen FQ(陈芳清), Li Y(李永), Qie GW(郝光武). 2008a. The ecophysiological response of *Polygonum hydropiper* plants to simulated flooding(水蓼对模拟水淹的生理生态学响应)[J]. *Ecol Env*(生态环境), **17**:1 096—1 099
- Chen FQ, Xie ZQ. 2007. Reproductive allocation, seed dispersal and germination of *Myricaria laxiflora*, an endangered species in the Three Gorges Reservoir Area[J]. *Plant Ecol*, **191**:67—75
- Chen FQ(陈芳清), Xie ZQ(谢宗强). 2008. Physiological and biochemical characteristics of *Myricaria laxiflora*, an endangered species in the Three Gorges Reservoir Area(三峡库区濒危植物疏花水柏枝的生理生化特性研究)[J]. *Guihaia*(广西植物), **28**:367—372
- Chen HJ, Robert GQ, Robert RB. 2005. Effect of soil flooding on photosynthesis, carbohydrate partitioning and nutrient uptake in the invasive exotic *Lepidium latifolium* [J]. *Aquat Bot*, **82**:250—268
- Close DC, Davidson NJ. 2003. Long-term waterlogging: nutrient, gas exchange photochemical and pigment characteristics of Eucalyptus nitens saplings[J]. *Russian J Plant Physiol*, **50**:843—847
- Dai FX(戴方喜), Xu WN(许文年), Liu DF(刘德富), et al. 2006. Pondering over falling zone ecosystem of the Three Gorges Reservoir and its ecological rehabilitation(对三峡水库消落区生态系统与其生态修复的思考)[J]. *Soil Water Conserv China*(中国水土保持), **12**:34—36
- Duan SS(段舜山), Guo YF(郭羽丰), Liu ZQ(刘振乾), et al. 2003. Over compensation growth of *Tetraselmis tetrethale* under the stress of nutrients deficiency(四列藻在营养限制胁迫下的超补偿生长研究)[J]. *Acta Ecol Sin*(生态学报), **23**:1 297—1 304
- Fernandez MD. 2006. Changes in photosynthesis and fluorescence in response to flooding in emerged and submerged leaves of *Pouteria orinocoensis*[J]. *Photosynthetica*, **44**:32—38
- Glaz B, Morris DR, Daroub SH. 2004. Sugarcane photosynthesis, transpiration, and stomatal conductance due to flooding and water table[J]. *Crop Sci*, **44**:1 633—1 672
- Islam MA, MacDonald SE. 2004. Ecophysiological adaptations of black spruce(*Picea mariana*) and tamarack(*Larix laricina*) seedlings to flooding[J]. *Trees*, **18**:35—42
- Kozlowski TT. 1984. Plant responses to flooding of soil[J]. *Bio Sci*, **34**:162—167
- Liang Y, Hu F, Yang M, et al. 2003. Antioxidative defenses and water deficit-induced oxidative damage in rice (*Oryza sativa*) growing on non-flooded paddy soils with ground mulching[J]. *Plant Soil*, **257**:407—416
- Malik AI, Colmer TD, Lambers H, et al. 2001. Changes in physiological and morphological traits of roots and shoots of wheat in response to different depths of waterlogging[J]. *Aust J Plant Physiol*, **28**:1 121—1 131
- Maricle BR, Lee RW. 2002. Aerenchyma development and oxygen transport in the estuarine cordgrasses *Spartina alterniflora* and *S. anglica*[J]. *Aquat Bot*, **74**:109—120
- Mielke MS, Almeida AF, Gomes FP, et al. 2003. Leaf gas exchange, chlorophyll fluorescence and growth responses of *Genipa americana* seedlings to soil flooding[J]. *Environ Exp Bot*, **50**:221—231
- Nicolas E, Torrecillas A, Amico JD. 2005. The effect of short-term flooding on the sap flow, gas exchange and hydraulic conductivity of young apricot trees[J]. *Trees*, **19**:51—57
- Parolin P. 2001. Morphological and physiological adjustments to waterlogging and drought in seedlings of Amazonian floodplain trees[J]. *Oecologia*, **128**(3):326—335
- Pezeshki SR. 2001. Wetland plant responses to soil flooding[J]. *Environ Exp Bot*, **46**:299—312
- Sha Wei(沙伟), Xu ZW(徐忠文), Wang XQ(王晓琦), et al. 2006. Leaf anatomy of *Carex pseudocuraica* growing in different environments of Sanjiang campagna(三江平原不同生境下漂筏苔草叶片解剖结构的研究)[J]. *Guihata*(广西植物), **26**:583—588
- Xue YH(薛艳红), Chen FQ(陈芳清), Fan DY(樊大勇), et al. 2007. Ecophysiological responses of *Buxus ichangensis* to summer waterlogging(宜昌黄杨对夏季淹水的生理生态学响应)[J]. *Biodiversity Sci*(生物多样性), **15**(5):542—547
- Yan ML(严美玲), Li XD(李向东), Lin YJ(林英杰), et al. 2007. Effects of drought during seedling stage on physiological traits, yield and quality of different peanut cultivars(苗期干旱胁迫对不同抗旱花生品种生理特性、产量和品质的影响)[J]. *Acta Agro Sin*(作物学报), **33**:113—119
- Yi YH(衣英华), Fan DY(樊大勇), Xie ZQ(谢宗强), et al. 2006. Effect of waterlogging on the gas exchange, chlorophyll fluorescence and water potential of *Quercus variabilis* and *Pterocarya stenoptera*(模拟淹水对枫杨和栓皮栎气体交换、叶绿素荧光和水势的影响)[J]. *Acta Phytoecol Sin*(植物生态学报), **30**:960—968
- Yordanova RY, Alexieva VS, Popova LP. 2003. Influence of root oxygen deficiency on photosynthesis and antioxidant status in barley plants[J]. *Russian J Plant Physiol*, **50**:163—167
- Yordanova RY, Christov KN, Popova LP. 2004. Antioxidative enzymes in barley plants subjected to soil flooding[J]. *Environ and Exp Bot*, **51**:93—102
- Zhao W(赵威), Wang ZH(王征宏). 2008. Plant compensatory growth(植物的补偿性生长)[J]. *Bull Biol*(生物学通报), **43**:12—13