

石 军,黄廷友,林立金,等. 覆盖耐性植物秸秆对牛膝菊光合生理的影响[J]. 江苏农业科学,2015,43(11):269-271,512.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2015.11.082

覆盖耐性植物秸秆对牛膝菊光合生理的影响

石 军¹,黄廷友¹,林立金^{2,3},廖明安²

(1. 绵阳市农业科学研究院,四川绵阳 621023; 2. 四川农业大学园艺学院,四川雅安 625014;

3. 雅安水土保持生态环境监测分站,四川雅安 625000)

摘要:通过盆栽试验,在镉污染土壤表面覆盖镉耐性植物(扬子毛茛、通泉草、邻近风轮菜和车前草)秸秆,研究了镉耐性植物秸秆对镉超富集植物牛膝菊光合生理的影响。结果表明:土壤表面覆盖扬子毛茛、邻近风轮菜和车前草秸秆后,牛膝菊叶片的净光合速率、蒸腾速率、光能利用率、胞间 CO_2 浓度、气孔导度、叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量、叶绿素总量及类胡萝卜素含量均降低,水分利用效率、叶表面蒸汽压亏缺提高。土壤覆盖通泉草秸秆后,牛膝菊叶片的净光合速率、蒸腾速率、水分利用效率、光能利用率和气孔导度均得到提高,分别较未覆盖提高了 13.02%、8.51%、4.15%、12.89% 和 12.94%,降低了胞间 CO_2 浓度和叶表面蒸汽压亏缺。土壤表面覆盖通泉草秸秆的牛膝菊叶片的叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量、叶绿素总量及类胡萝卜素含量均高于未覆盖,分别较未覆盖提高了 12.04%、8.51%、11.19% 和 10.14%。土壤表面覆盖改变了牛膝菊植株的可溶性糖含量,其中覆盖通泉草秸秆降低了牛膝菊根、茎、叶的可溶性糖含量。因此,在镉污染土壤表面覆盖通泉草秸秆可以有效提高牛膝菊的光合作用,促进牛膝菊生长。

关键词:牛膝菊;耐性植物;光合生理;化感作用

中图分类号: X53;Q945.11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2015)11-0269-03

目前,农田重金属污染严重,而生物修复技术被认为具有物理、化学修复方法所无法比拟的优点,诸如费用低廉、不破坏场地结构、不造成二次污染等^[1-2],能在不破坏土壤生态环境、保持土壤结构和微生物的状态下,通过植物的根系直接将重金属从土壤中吸收并转移到植物地上部分,从而达到修复被污染土壤的目的^[3],已成为修复土壤重金属污染研究领域的一项新兴技术,并在全球范围内开展重金属超富集植物的筛选,取得了很好的成果。然而,已知的重金属超富集植物生物量普遍偏小,生长缓慢,从而限制了植物修复技术的推广与应用^[4]。因而进一步开展重金属超富集植物的筛选或改良现有的金属超富集植物是很有必要的。

植物化感作用是指一种植物向环境释放某些化学物质而影响其他植物的生长和发育的化学生态学现象,包括促进和抑制两方面作用,其产生的化学物质称为化感物质^[5]。植物化感作用广泛存在于自然界中,与植物间的光、水分、养分和空间的竞争一起构成了植物之间的相互作用^[6-7]。植物化感物质通过雨雾淋溶、自然挥发、根系分泌和植株分解 4 种途径释放到环境中^[8],对植物化感作用的研究也多集中在植株分(降)解上^[9-10]。有研究表明,化感物质会对植物的光合作用产生显著的影响^[11],如巨桉凋落叶释放化感物质能引起小白菜光合效能下降、光合机构受损、光合速率下降^[12],也能抑制假俭草的生长、生物量的积累以及光合色素的合成^[13]。由此

推断,若将植物秸秆施入土壤中,利用化感物质也应该能够改变重金属超富集植物的光合生理特性和生长,但有关植物秸秆分解所产生的化感物质对超富集植物光合生理的影响研究尚未见报道。

扬子毛茛(*Ranunculus sieboldii*)、通泉草(*Mazus japonicus*)、邻近风轮菜(*Clinopodium confine*)和车前草(*Plantago asiatica*)是本研究前期筛选的镉耐性植物,对镉具有很强的耐性。牛膝菊(*Galinsoga parviflora*)为菊科牛膝菊属一年生草本植物,是一种镉超富集植物^[14]。本研究将这 4 种镉耐性植物秸秆覆盖在镉污染土壤表面,研究镉耐性植物对牛膝菊光合生理的影响,以期筛选出能提高牛膝菊光合能力的耐性植物,为牛膝菊修复镉污染土壤提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土壤为紫色土,取自四川农业大学雅安校区农场农田(29°59'N,102°59'E),其基本理化性质详见参考文献[15]。

镉耐性植物扬子毛茛(*Ranunculus sieboldii*)、通泉草(*Mazus japonicus*)、邻近风轮菜(*Clinopodium confine*)和车前草(*Plantago asiatica*)于 2013 年 8 月采自四川农业大学雅安校区农场农田,采集区土壤未被重金属污染。

牛膝菊幼苗于 2013 年 9 月直接采自四川农业大学雅安校区农场农田(未被重金属污染区)。

1.2 试验方法

试验于 2013 年 8—10 月在四川农业大学雅安校区农场进行。2013 年 8 月,将土壤风干、压碎、过 5 mm 筛后,分别称取 4.0 kg 装于高 18 cm、直径 21 cm 的塑料盆内,加入分析纯 $\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ 溶液,使其镉浓度为 10 mg/kg,并与土壤充分

收稿日期:2014-11-17

基金项目:国家农业科技成果转化资金(编号:2011GB2F000006)。

作者简介:石 军(1980—),男,四川绵阳人,博士,研究方向为植物病理学。E-mail:tibm@163.com。

通信作者:廖明安,博士,教授,博士生导师,主要从事果树生理生态及栽培研究。E-mail:lman@sicau.edu.cn。

混匀,保持淹水状态,自然放置平衡 4 周后再次混合备用。2013 年 9 月,选择长势一致,2 对真叶展开的牛膝菊幼苗移栽至盆中,之后将处理好的 4 种耐性植物秸秆直接覆盖于盆栽土壤表面,每盆覆盖 6 g,折合 225 g/m²。试验设置 5 个处理,分别为未覆盖(CK)、覆盖扬子毛茛、覆盖邻近风轮菜、覆盖通泉草、覆盖车前草。每盆种植牛膝菊幼苗 5 株,每个处理重复 3 次。于透明遮雨棚内栽培,根据土壤水分实际情况不定期浇水确保土壤水分保持在田间持水量的 80% 左右。50 d 后牛膝菊处于盛花期,测定牛膝菊叶片的光合色素含量、光合作用及根、茎、叶的可溶性糖含量。

1.3 各项指标的测定方法

光合色素含量(叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量、叶绿素总量及类胡萝卜素含量)采用丙酮-乙醇混合(1:1)浸提法^[16]测定。光合作用采用 LI-6400 便携式光合测定仪(LI-COR Inc., USA)测定,人工控制 CO₂ 浓度为 400 μmol/mol、温度 25 ℃、光照强度为 1 200 μmol/(m²·s),测定叶片净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)、胞间 CO₂ 浓度(C_i)和叶表面蒸汽压亏缺(V_{pdl}),每个测定重复 3 次。可溶性糖含量采用蒽酮比色法^[16]测定。

1.4 数据处理方法

数据采用 DPS 系统进行方差分析(Duncan's 新复极差法进行多重比较)。水分利用效率(WUE)=净光合速率(P_n)/

蒸腾速率(T_r);光能利用率(LUE)=净光合速率(P_n)/光照强度^[17]。

2 结果与分析

2.1 覆盖耐性植物秸秆对牛膝菊叶片光合速率及蒸腾速率的影响

由表 1 可知,土壤表面覆盖耐性植物秸秆后,只有覆盖通泉草秸秆的牛膝菊叶片净光合速率、蒸腾速率和光能利用率均高于未覆盖,分别比各自未覆盖提高了 13.02% ($P<0.05$)、8.51% ($P<0.05$)和 12.97% ($P<0.05$),其余 3 种处理的牛膝菊叶片净光合速率、蒸腾速率和光能利用率均低于未覆盖,这说明能否提高牛膝菊叶片的光合速率与耐性植物的种类有关。牛膝菊叶片净光合速率和光能利用率的大小顺序相同,为覆盖通泉草>未覆盖>覆盖邻近风轮菜>覆盖车前草>覆盖扬子毛茛,蒸腾速率的大小顺序为覆盖通泉草>未覆盖>覆盖扬子毛茛>覆盖邻近风轮菜>覆盖车前草。土壤表面覆盖扬子毛茛、通泉草、邻近风轮菜和车前草秸秆后,牛膝菊叶片水分利用效率均高于未覆盖,分别较未覆盖提高了 8.05%、4.15%、15.61%和 12.93%,这说明土壤表面覆盖耐性植物秸秆在一定程度上促进了牛膝菊叶片的水分利用效率。

表 1 覆盖耐性植物秸秆对牛膝菊叶片光合速率及蒸腾速率的影响

耐性植物	净光合速率 P_n [μmol/(m ² ·s)]	蒸腾速率 T_r [mmol/(m ² ·s)]	水分利用效率 WUE (μmol/mmol)	光能利用率 LUE (μmol/μmol)
未覆盖(CK)	7.68 ± 0.21b	1.88 ± 0.26b	4.10 ± 0.08b	0.006 40 ± 0.000 84ab
覆盖扬子毛茛	6.74 ± 0.68c	1.54 ± 0.19c	4.43 ± 0.86ab	0.005 61 ± 0.000 57b
覆盖通泉草	8.68 ± 0.54a	2.04 ± 0.20a	4.27 ± 0.21ab	0.007 23 ± 0.000 46a
覆盖邻近风轮菜	7.07 ± 0.78c	1.50 ± 0.25c	4.74 ± 0.28a	0.005 89 ± 0.000 65ab
覆盖车前草	6.89 ± 0.22c	1.49 ± 0.27c	4.63 ± 0.09ab	0.005 74 ± 0.000 94b

注:同列数据后不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。下同。

2.2 覆盖耐性植物秸秆对牛膝菊叶片气体交换参数的影响

由表 2 可知,土壤表面覆盖耐性植物后,牛膝菊叶片胞间 CO₂ 浓度均低于未覆盖,其大小顺序为未覆盖>覆盖通泉草>覆盖扬子毛茛>覆盖邻近风轮菜>覆盖车前草。覆盖通泉草秸秆提高了牛膝菊叶片的气孔导度,较未覆盖提高了 12.94% ($P>0.05$),其余 3 种处理均低于未覆盖。牛膝菊叶片气孔导度大小顺序为覆盖通泉草>未覆盖>覆盖扬子毛

茛>覆盖邻近风轮菜>覆盖车前草。就叶表面蒸汽压亏缺而言,覆盖通泉草秸秆的牛膝菊叶片叶表面蒸汽压亏缺低于未覆盖,较未覆盖降低了 3.19% ($P>0.05$),覆盖扬子毛茛、邻近风轮菜和车前草的牛膝菊叶片叶表面蒸汽压亏缺则高于未覆盖,分别较未覆盖提高了 2.55% ($P>0.05$)、2.02% ($P>0.05$)和 6.70% ($P<0.05$)。

表 2 覆盖耐性植物秸秆对牛膝菊叶片气体交换参数的影响

耐性植物	胞间 CO ₂ 浓度 C_i (μmol/mol)	气孔导度 G_s [mol/(m ² ·s)]	叶表面蒸汽压亏缺 V_{pdl} (kPa)
未覆盖(CK)	323.0 ± 3.01a	0.201 ± 0.040a	0.940 ± 0.043b
覆盖扬子毛茛	316.4 ± 7.17ab	0.158 ± 0.025b	0.964 ± 0.028ab
覆盖通泉草	320.7 ± 6.35ab	0.227 ± 0.034a	0.910 ± 0.045b
覆盖邻近风轮菜	312.7 ± 7.62ab	0.155 ± 0.031b	0.959 ± 0.035ab
覆盖车前草	309.5 ± 3.80b	0.147 ± 0.036b	1.003 ± 0.047a

2.3 覆盖耐性植物秸秆对牛膝菊叶片光合色素含量的影响

从表 3 可以看出,土壤表面覆盖耐性植物秸秆后,只有覆盖通泉草秸秆的牛膝菊叶片叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量、叶绿素总量和类胡萝卜素含量均高于未覆盖,分别比各自未覆

盖提高了 12.04% ($P<0.05$)、8.51% ($P<0.05$)、11.19% ($P<0.05$)和 10.14% ($P<0.05$),其他 3 种处理均低于未覆盖。牛膝菊叶片的叶绿素 a 含量与叶绿素总量大小顺序相同,为覆盖通泉草>未覆盖>覆盖邻近风轮菜>覆盖车前

草 > 覆盖扬子毛茛, 叶绿素 b 含量大小顺序为覆盖通泉草 > 未覆盖 > 覆盖车前草 > 覆盖邻近风轮菜 > 覆盖扬子毛茛。对于叶绿素 a/叶绿素 b 而言, 土壤表面覆盖耐性植物秸秆后,

牛膝菊叶片的叶绿素 a/叶绿素 b 均高于未覆盖, 其大小顺序为覆盖扬子毛茛 > 覆盖邻近风轮菜 > 覆盖车前草 > 覆盖通泉草 > 未覆盖。

表 3 覆盖耐性秸秆对牛膝菊叶片光合色素含量的影响

耐性植物	叶绿素 a 含量 (mg/g)	叶绿素 b 含量 (mg/g)	叶绿素总量 (mg/g)	叶绿素 a/叶绿素 b	类胡萝卜素含量 (mg/g)
未覆盖(CK)	1.013 ± 0.028b	0.329 ± 0.018b	1.34 ± 0.046b	3.08	0.414 ± 0.013b
覆盖扬子毛茛	0.910 ± 0.005c	0.242 ± 0.003d	1.15 ± 0.008d	3.77	0.362 ± 0.007c
覆盖通泉草	1.135 ± 0.034a	0.357 ± 0.005a	1.49 ± 0.039a	3.18	0.456 ± 0.012a
覆盖邻近风轮菜	0.990 ± 0.020b	0.268 ± 0.001c	1.26 ± 0.021c	3.69	0.383 ± 0.004c
覆盖车前草	0.978 ± 0.086b	0.270 ± 0.002c	1.25 ± 0.088c	3.63	0.383 ± 0.032c

2.4 覆盖耐性植物秸秆对牛膝菊植物可溶性糖含量的影响

从表 4 中可以看出, 在土壤表面覆盖耐性植物秸秆以后, 牛膝菊根系的可溶性糖含量均显著低于未覆盖 ($P < 0.05$), 其中覆盖通泉草秸秆的可溶性糖含量最低, 比未覆盖降低了 72.24%, 这说明覆盖耐性植物能够降低牛膝菊根部可溶性糖的消耗。牛膝菊茎的可溶性糖含量大小顺序为覆盖扬子毛茛 > 覆盖邻近风轮菜 > 未覆盖 > 覆盖车前草 > 覆盖通泉草, 叶片的可溶性糖含量大小顺序为覆盖邻近风轮菜 > 覆盖通泉草 > 未覆盖 > 覆盖扬子毛茛 > 覆盖车前草。这说明覆盖耐性植物秸秆能够影响光合产物在牛膝菊源流库中的分配。

表 4 覆盖耐性植物秸秆对牛膝菊植株可溶性糖含量的影响

耐性植物	可溶性糖含量(mg/g, DW)		
	根	茎	叶
未覆盖(CK)	182.28 ± 5.45a	81.48 ± 7.07bc	54.29 ± 3.52c
覆盖扬子毛茛	135.30 ± 7.11b	125.90 ± 5.92a	33.40 ± 2.51d
覆盖通泉草	50.61 ± 9.94e	51.31 ± 9.72d	71.43 ± 7.79b
覆盖邻近风轮菜	106.61 ± 5.89c	88.51 ± 7.52b	81.81 ± 3.97a
覆盖车前草	86.61 ± 3.01d	72.00 ± 8.82c	25.64 ± 6.81d

3 讨论

植株秸秆在分解过程中会释放化学物质, 直接或间接地影响其自身发育以及周围植被和微生物生长^[18]。化感物质是植物秸秆在微生物的作用下腐烂、分解逐渐释放出来的化学物质, 对植物产生有利或有害的作用^[7]。研究表明, 化感物质对植物的光合作用能够产生促进或抑制作用, 这与植物的种类有关^[11-13]。本试验结果表明, 土壤表面覆盖耐性植物秸秆后, 只有覆盖通泉草秸秆的牛膝菊植株叶片净光合速率、蒸腾速率与光能利用率均高于未覆盖, 其他 3 种处理均低于未覆盖, 这说明提高牛膝菊叶片的光合速率与蒸腾速率和不同耐性植物秸秆分解的化感物质不同有关。土壤表面覆盖扬子毛茛、通泉草、邻近风轮菜和车前草秸秆后, 牛膝菊叶片水分利用效率均高于未覆盖, 说明土壤表面覆盖耐性植物秸秆在一定程度上促进了牛膝菊叶片的水分利用效率, 可能与这些植物秸秆覆盖土壤表面后, 减少了土壤表面水分蒸发有关。

在光合作用过程中, CO₂ 从空气中向叶片叶绿体光合部位的传播受到众多因素的影响(如细胞内 CO₂ 浓度、气孔导度等), 而气孔是植物叶片中最重要的气体运输通道, 直接控制了 CO₂ 向叶片的传导以及叶片的蒸腾效率^[19]。Wong 等研究表明, 光合速率与气孔导度之间存在一定的反馈调节机制, 在有利于叶肉光合作用时, 气孔导度增大; 反之则减小^[20]。

Mersie 等研究也表明阿魏酸和香草酸这 2 种化感物质能导致天鹅绒叶片的气孔导度降低, 叶片阻力上升, 光合速率显著下降^[21]。本试验研究表明, 通泉草秸秆的化感作用导致牛膝菊叶片气孔导度增加, 叶片光合作用所需的 CO₂ 量也随之增加, 降低了胞间 CO₂ 浓度和叶表面蒸汽压亏缺, 从而增强了牛膝菊叶片光合作用的进行。土壤表面覆盖扬子毛茛、邻近风轮菜和车前草秸秆的化感作用则导致牛膝菊叶片气孔度降低, 提高了叶表面蒸汽压亏缺, 抑制了牛膝菊叶片光合作用的进行。

叶片是绿色植物进行光合作用的重要器官, 而叶绿素则是光合作用最重要的色素, 其含量的高低直接影响光合产物合成的产量^[22]。陈晓丽等研究证实, 小麦秸秆能够显著提高番茄叶片中叶绿素的含量, 提高光合作用^[23]。然而, 陈良华等研究表明, 土壤施用巨桉凋落叶却降低了小白菜叶绿素含量, 抑制其光合作用^[12]。本试验研究表明, 覆盖通泉草秸秆能够提高牛膝菊叶片的叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量、叶绿素总量及类胡萝卜素含量, 这有利于提高牛膝菊光合作用的提高, 而其他处理则降低了牛膝菊叶片的光合色素含量。就光合产物而言, 覆盖耐性植物秸秆后, 牛膝菊植物的可溶性糖含量在源流库中的分配被改变, 进而影响了牛膝菊对镉污染的抗性。

参考文献:

- [1] McGrath S P, Zhao F J, Lombi E. Phytoremediation of metals, metalloids, and radionuclides[J]. *Advances in Agronomy*, 2002, 75: 1 - 56.
- [2] Lone M I, He Z L, Stoffella P J, et al. Phytoremediation of heavy metal polluted soils and water: progresses and perspectives[J]. *Journal of Zhejiang University - Science B*, 2008, 9(3): 210 - 220.
- [3] 何启贤. 镉超富集植物筛选研究进展[J]. *环境保护与循环经济*, 2013, 33(1): 46 - 49.
- [4] Eapen S, D'Souza S F. Prospects of genetic engineering of plants for phytoremediation of toxic metals[J]. *Biotechnology Advances*, 2005, 23(2): 97 - 114.
- [5] Rich E L. Allelopathy[M]. 2nd ed. New York: Academic Press Inc, 1984: 309 - 315.
- [6] 陈静雯, 张丽. 植物化感作用的机理及应用前景[J]. *生物学通报*, 2008, 43(11): 13 - 15.
- [7] 闫世江, 张继宁, 刘洁, 等. 化感作用及其在蔬菜中的应用[J]. *种子*, 2009, 28(2): 103 - 105.

(下转第 512 页)

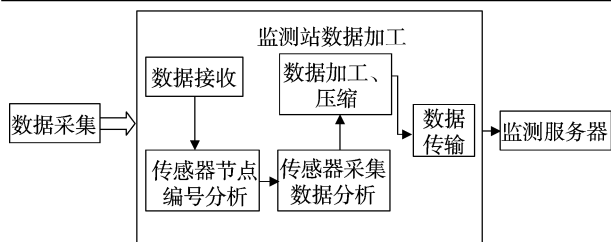


图6 系统数据优化流程图示

集数据的服务。该服务针对河蟹病原体数据进行分析,得出河蟹养殖过程中的病原体是否超过阈值,如果超过阈值,系统则预警,否则实时显示数据。为了更直观地提供预警服务,本系统在实现时将河蟹养殖病原体信息直接嵌入到 GIS 系统中,这样管理人员在监控河蟹养殖数据时可直观地观测到河蟹养殖数据。本系统中的预警服务流程如下:(1)采集点位置预处理。将采集点位置预先保存在 GIS 数据库中,同时将采集点进行编号,形成一一对应的表格,这样减少采集点定位成本,同时也减少采集点定位不准确的问题。(2)采集数据反馈。采集点须要将采集点编号和采集的数据一起传给服务器,服务器根据采集点编号将采集的数据进行处理,根据采集点编号查找到 GIS 数据,然后直接显示在 GIS 系统中。(3)阈值设置。本系统的阈值可设定固定值,也可根据一定的统计规律计算出 1 个有效的阈值,这样将采集的数据直接和阈值数据进行比对,如果在阈值之内,GIS 系统中的数据正常显示,否则显示报警提示。

4 应用试验

试验选取面积为 0.033 hm^2 的池塘,将 5 个硝化细菌传感器均匀地分布在塘底。监测 2 h 后统计结果(表 1)。从表 1 可以看出,通过传感器实时监测池塘底的环境和病原体数量,后期通过统计规律计算出 1 个有效的阈值实现实时预警。

(上接第 271 页)

- [8] 张学文,刘亦学,刘万学,等. 植物化感物质及其释放途径[J]. 中国农学通报,2007,23(7):295-297.
- [9] 孙 星,刘 勤,王德建,等. 长期秸秆还田对土壤肥力质量的影响[J]. 土壤,2007,39(5):782-786.
- [10] 田慎重,宁堂原,王 瑜,等. 不同耕作方式和秸秆还田对麦田土壤有机碳含量的影响[J]. 应用生态学报,2010,21(2):373-378.
- [11] 贾黎明,翟明普,冯长红,等. 化感作用物对油松幼苗生长及光合作用的影响[J]. 北京林业大学学报,2003,25(4):6-10.
- [12] 陈良华,弓 平,杨万勤,等. 巨桉凋落叶分解初期对小白菜光合生理特性的影响[J]. 四川农业大学学报,2012,30(2):174-180.
- [13] 李羿桥,李 西,胡庭兴,等. 巨桉凋落叶分解对假俭草生长及光合特性的影响[J]. 草业学报,2013,22(3):169-176.
- [14] 金 倩. 牛膝菊对镉的耐性及超富集特性研究[D]. 雅安:四川农业大学,2014.
- [15] 林立金,廖明安,梅洛银,等. 不同生态型小飞蓬对镉胁迫砷木樱桃植株磷钾吸收的影响[J]. 中国生态农业学报,2013,21

表 1 传感器监测结果

传感器编号	病原体数量 (个)	水温 (℃)	pH 值	溶氧量 (mg/L)
1	12	22	7.3	5.56
2	23	22	7.4	5.25
3	10	22	7.3	5.48
4	11	22	7.3	5.97
5	16	22	7.3	5.72

5 结论

系统利用传感器技术与无线通信技术实现了河蟹病原体数据和养殖区域水质参数的实时采集与传输,采集数据汇聚到监测服务器,经过处理后存入数据库中并同时在终端设备预警。本系统构建成本低,具有较强的可扩展性,在河蟹养殖实时监测领域具有良好的应用前景。

参考文献:

- [1] 邢 华. 河蟹养殖常见疾病的预防及治疗[J]. 中国水产, 2003 (6): 85-86.
- [2] 马莉萍, 毛 斌, 刘 斌, 等. 生物传感器的应用现状与发展趋势[J]. 传感器与微系统, 2009(4): 1-4.
- [3] 曾文南, 仝金萍, 汪凌云, 等. 共轭聚合物传感器用于病原体检测的研究进展[J]. 有机化学, 2009, 29(11): 1858-1866.
- [4] Akyldiz I F, Su W, Sankarasubramanian Y, et al. A survey on sensor networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2002, 40(8): 102-114.
- [5] Culler D, Srivastava D M. Overview of sensor network[J]. IEEE Computer Magazine, 2004, 37(8): 47-49.
- [6] Heinzelman W B, Chandrakasan A P, Balakrishnan H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2002, 1(4): 660-670.
- (12): 1565-1568.
- [16] 郝再彬, 苍 晶, 徐 仲, 等. 植物生理学实验[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2004.
- [17] 蒋小军, 王 恒, 彭 伟, 等. 锌铬复合污染对水稻光合生理生态的影响[J]. 陕西农业科学, 2008, 54(1): 56-58, 80.
- [18] 郭剑芬, 杨玉盛, 陈光水, 等. 森林凋落物分解研究进展[J]. 林业科学, 2006, 42(4): 93-100.
- [19] 应小芳, 刘 鹏. 铝胁迫对大豆叶片光合特性的影响[J]. 应用生态学报, 2005, 16(1): 166-170.
- [20] Wong S C, Cowan I R, Farquhar G R. Stomatal conductance correlates with photosynthetic capacity[J]. Nature, 1994, 282: 424-426.
- [21] Mersie W, Singh M. Phenolic acids affect photosynthesis and protein synthesis by isolated leaf cells of velvet-leaf[J]. Journal of Chemical Ecology, 1993, 19: 1293-1301.
- [22] 张 伏, 张亚坤, 毛鹏军, 等. 植物叶绿素测定方法研究现状及发展[J]. 农机化研究, 2014, 36(4): 238-241.
- [23] 陈晓丽, 郑 群, 张 辉, 等. 不同作物秸秆堆肥对番茄生长发育的影响[J]. 新疆农垦科技, 2013(10): 30-32.