

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

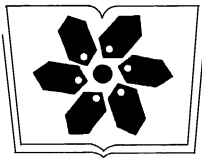
Acta Ecologica Sinica



第 31 卷 第 22 期 Vol.31 No.22 **2011**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 31 卷 第 22 期

2011 年 11 月 (半月刊)

目 次

叶冠尺度野鸭湖湿地植物群落含水量的高光谱估算模型	林 川, 宫兆宁, 赵文吉 (6645)
中国水稻潜在分布及其气候特征	段居琦, 周广胜 (6659)
大豆异黄酮浸种对盐胁迫大豆幼苗的生理效应	武玉妹, 周 强, 於丙军 (6669)
黑河中游荒漠绿洲过渡带多枝桧柳对地下水位变化的生理生态响应与适应	张 佩, 袁国富, 庄 伟, 等 (6677)
高寒退化草地甘肃臭草种群分布格局及其对土壤水分的响应	赵成章, 高福元, 石福习, 等 (6688)
基于生态足迹思想的皂市水利枢纽工程生态补偿标准研究	肖建红, 陈绍金, 于庆东, 等 (6696)
基于 MODIS 黄河三角洲湿地 NPP 与 NDVI 相关性的时空变化特征	蒋蕊竹, 李秀启, 朱永安, 等 (6708)
高分辨率影像支持的群落尺度沼泽湿地分类制图	李 娜, 周德民, 赵魁义 (6717)
土壤食细菌线虫对拟南芥根系生长的影响及机理	成艳红, 陈小云, 刘满强, 等 (6727)
基于网络 K 函数的西双版纳人工林空间格局及动态	杨珏婕, 刘世梁, 赵清贺, 等 (6734)
树轮灰度与树轮密度的对比分析及其对气候要素的响应	张同文, 袁玉江, 喻树龙, 等 (6743)
冀北山地阴坡优势树种的树体分维结构	田 超, 刘 阳, 杨新兵, 等 (6753)
帽峰山常绿阔叶林辐射通量特征	陈 进, 陈步峰, 潘勇军, 等 (6766)
不同类型拌种剂对花生及其根际微生物的影响	刘登望, 周 山, 刘升锐, 等 (6777)
一种自优化 RBF 神经网络的叶绿素 a 浓度时序预测模型	仝玉华, 周洪亮, 黄浙丰, 等 (6788)
不同种源麻栎种子和苗木性状地理变异趋势面分析	刘志龙, 虞木奎, 马 跃, 等 (6796)
黄土丘陵区植物叶片与细根功能性状关系及其变化	施 宇, 温仲明, 龚时慧 (6805)
干旱区五种木本植物枝叶水分状况与其抗旱性能	谭永芹, 柏新富, 朱建军, 等 (6815)
火灾对马尾松林地土壤特性的影响	薛 立, 陈红跃, 杨振意, 等 (6824)
江苏省太湖流域产业结构的水环境污染效应	王 磊, 张 磊, 段学军, 等 (6832)
高温对两种卡帕藻的酶活性、色素含量与叶绿素荧光的影响	赵素芬, 何培民 (6845)
江苏省典型干旱过程特征	包云轩, 孟翠丽, 申双和, 等 (6853)
黄土高原半干旱草地地表能量通量及闭合率	岳 平, 张 强, 杨金虎, 等 (6866)
光质对烟叶光合特性、类胡萝卜素和表面提取物含量的影响	陈 伟, 蒋 卫, 邱雪柏, 等 (6877)
铜陵铜尾矿废弃地生物土壤结皮中的蓝藻多样性	刘 梅, 赵秀侠, 詹 婧, 等 (6886)
圈养马麝刻板行为表达频次及影响因素	孟秀祥, 贡保草, 薛达元, 等 (6896)
田湾核电站海域浮游动物生态特征	吴建新, 阎斌伦, 冯志华, 等 (6902)
马鞍列岛多种生境中鱼类群聚的昼夜变化	汪振华, 王 凯, 章守宇 (6912)
基于认知水平的非使用价值支付动机研究	钟满秀, 许丽忠, 杨 净 (6926)
综述	
植物盐胁迫应答蛋白质组学分析	张 恒, 郑宝江, 宋保华, 等 (6936)
沉积物氮形态与测定方法研究进展	刘 波, 周 锋, 王国祥, 等 (6947)
野生鸟类传染性疾病预防研究进展	刘冬平, 肖文发, 陆 军, 等 (6959)
鱼类通过鱼道内水流速度障碍能力的评估方法	石小涛, 陈求稳, 黄应平, 等 (6967)
专论	
IPBES 的建立、前景及应对策略	吴 军, 徐海根, 丁 晖 (6973)
研究简报	
柠条人工林幼林与成林细根动态比较研究	陈建文, 王孟本, 史建伟 (6978)

期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 344 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 35 * 2011-11



封面图说: 滩涂芦苇及野鸭群——中国的海岸湿地, 尤其是长江入海口以北的海岸线, 多为泥质性海滩, 地势宽阔低洼, 动植物资源丰富, 生态类型独特, 为迁徙的鸟提供了丰富的食物和休息、庇护的良好环境, 成为东北亚内陆和环西太平洋鸟类迁徙的重要中转站和越冬、繁殖地。一到迁徙季节, 成千上万的各种鸟类飞临这里, 尤其是雁鸭类数量庞大, 十分壮观。

彩图提供: 陈建伟教授 国家林业局 E-mail: cites.chenjw@163.com

林川, 宫兆宁, 赵文吉. 叶冠尺度野鸭湖湿地植物群落含水量的高光谱估算模型. 生态学报, 2011, 31(22): 6645-6658.

Lin C, Gong Z N, Zhao W J. Hyperspectral estimation models for plant community water content at both leaf and canopy levels in Wild Duck Lake wetland. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(22): 6645-6658.

叶冠尺度野鸭湖湿地植物群落 含水量的高光谱估算模型

林 川, 宫兆宁*, 赵文吉

(首都师范大学资源环境与旅游学院; 三维信息获取与应用教育部重点实验室;

资源环境与地理信息系统北京市重点实验室; 北京市城市环境过程与数字模拟国家重点实验室培育基地, 北京 100048)

摘要: 利用高光谱遥感技术定量估测野鸭湖湿地植被含水量, 对于监测和诊断野鸭湖湿地植被的生理状况及生长趋势具有重要意义, 也能够为高光谱遥感影像在野鸭湖湿地植被含水量诊断中的实际应用提供理论依据和技术支持。采用 Field Spec 3 野外高光谱辐射仪, 获取了野鸭湖典型湿地植被冠层和叶片的光谱, 并测定了对应的含水量。以上述实测数据为基础, 首先以芦苇为例初步探明了不同含水量水平下典型湿地植被冠层和叶片光谱反射率的响应模式, 然后采用相关性及单变量线性与非线性拟合分析技术, 从冠层和叶片两种层次, 对不同尺度下的含水量与“三边”参数及高光谱植被指数进行了分析拟合, 并采用交叉检验中的 3K-CV 方法对估算模型进行了测试和检验, 确立了不同尺度下野鸭湖湿地植被含水量的定量监测模型。结果表明: (1) 随着含水量水平的增加, 芦苇冠层与叶片光谱在可见光波段(350—760 nm)和红外波段(760—2500 nm)的反射率均呈逐渐降低趋势。(2) 不同尺度含水量与选取的光谱特征参数整体上相关性较强, 与“三边”参数基本上都呈极显著相关, 相关系数最大达到 0.906; 与高光谱指数全部呈极显著相关, 相关系数最小为 0.455, 最大达到 0.919, 并通过选取不同尺度上相关性最佳的光谱特征参数, 分别基于“三边”参数和高光谱植被指数构建了不同尺度下的含水量估算模型。其中, 冠层尺度下, 黄边面积(SDy)与 SRWI(Simple Ratio Water Index)的估算效果最好, 估算模型分别为 $y = -9.462x^2 - 2.671x + 0.608$ 和 $y = 0.219e^{1.010x}$; 叶片尺度下, 红边面积(SDr)与 WI(Water Index)的估算效果最好, 估算模型分别为 $y = 0.562x + 0.376$ 和 $y = 2.028x^2 - 0.476x - 1.009$ 。通过 3K-CV 的交叉验证, 不同尺度下的含水量估算模型均取得了较为理想的预测精度, 预测精度的最小值为 94.92%, 最大值为 97.06%, 表明估测模型具有较高的可靠性与普适性。(3) 高光谱植被指数与含水量拟合方程的拟合度相对高于“三边”参数与之建立方程的拟合度, 说明多波段组合的光谱特征参数更适合含水量的判别。

关键词: 湿地植被; 植被含水量; 高光谱; “三边”参数; 植被指数; 北京野鸭湖湿地

Hyperspectral estimation models for plant community water content at both leaf and canopy levels in Wild Duck Lake wetland

LIN Chuan, GONG Zhaoning*, ZHAO Wenji

College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University; Key Laboratory of 3D Information Acquisition and Application of Ministry of Education; Key Laboratory of Resources Environment and GIS of Beijing Municipal; Base of the State Laboratory of Urban Environmental Processes and Digital Modeling, Beijing 100048, China

Abstract: Quantitative estimation of vegetation water content with hyperspectral remote sensing technique is of great significance for vegetation physiological status and growth trend monitoring. It also provides a theoretical foundation for actual application of vegetation water content diagnosis using hyperspectral remote sensing images in Wild Duck Lake wetland. The hyperspectral reflectance and corresponding water content of canopy and leaf of typical wetland vegetation were

基金项目: 国际科技合作项目(2010DFA92400); 国家科技支撑计划重点项目(2007BAH15B02); 北京市科技计划项目(D08040600580801); 国家测绘地理信息局科技计划项目 2011

收稿日期: 2011-05-31; 修订日期: 2011-09-28

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gongzhn@163.com

measured by Field-Spec 3 wild high-spectrum radiometer. We used reed as an example to prove the response mode of the spectral reflectance in different water content levels. Then the correlation among water content, trilateral parameters, and hyperspectral vegetation index and hyperspectral estimation models were obtained by using regression and correlation analysis in canopy and leaf levels. In addition, we made use of Three K-fold Cross Validation to test and inspect the hyperspectral estimation models. The results show: a) The canopy and leaf spectral reflectance of reed in visible bands (350—760nm) and infrared bands (760—2500nm) reflectivity tends to reduce gradually. b) We found strong correlation between the selected spectrum characteristic parameters and different water content scales. For trilateral parameters, they show significant correlation with a maximum correlation coefficient of 0.906. For the hyperspectral vegetation index, they all show significant correlation, with a minimum correlation coefficient of 0.455 and a maximum of 0.919. Based on the trilateral parameters and hyperspectral vegetation index, we choose the spectrum characteristic parameters that have the best correlation in different scales to construct the water content estimation models. SDy and simple ratio water index have the best effect at canopy level; the best models are evaluated and validated as $y = -9.462x^2 - 2.671x + 0.608$ and $y = 0.219e^{1.010x}$, respectively. SDr and water index have the best effect at leaf level; the best models are evaluated and validated as $y = 0.562x + 0.376$ and $y = 2.028x^2 - 0.476x - 1.009$, respectively. According to Three K-fold Cross Validation examination, these estimation models have the satisfactory prediction accuracy, with a minimum prediction accuracy of 94.92% and a maximum of 97.06%. Those results indicate that the parameters adopt in this paper have great reliability and applicability for water content estimation. c) We make use of the hyperspectral remote sensing to analyze and estimate wetland vegetation water content, and this method is a new nondestructive testing technology. Compared to the traditional physiological and biochemical analysis method in the laboratory, the remote sensing method not only gets non-point source information, but also reduces the analysis cost greatly, and greatly improves the efficiency of the analysis. The hyperspectral vegetation index has a higher degree of fitting than the trilateral parameters, so the spectrum characteristic parameters of band combination are more suitable for water content discrimination. d) For future research, we need to analyze further and systematically the relationship between spectral indexes and water content, and between the spectral indexes and any single band or combination of two bands in ratio (SD) and the normalized (ND) from 350 to 2500 nm. We plan to use the special handheld blade spectrum detectors to determine the leaf spectral reflectance, so that the reliability and accuracy of estimation model will be further enhanced.

Key Words: wetland vegetation; vegetation water content; hyperspectral; trilateral parameters; vegetation index; Wild Duck Lake wetland, Beijing

植被是陆地生态系统的重要组成部分,植物中的生化物质都直接或者间接的参与生物地球化学循环,在生态系统的能量和物质循环中发挥着至关重要的作用。其中植物冠层和叶片中的水分含量约占 40%—80%,而水分是控制植被光合作用、呼吸作用以及生物量的主要因素之一,水分亏缺会直接影响植物的生理生化过程和形态结构,从而影响植物的生长与发育。因此,及时准确的监测或诊断冠层和叶片的含水量对于反映植被的生理状况,趋利避害,以及对火灾、旱灾和生态安全的监测等具有重要意义^[1]。

传统的对于植被含水量的监测和估算,有多种野外实测方法,但这些监测与估算方法局限于小面积或单株植被上,获取的植被含水量信息只反映了采样点周边较小范围和较短时间内的状况,所得到的结论必定会带有某些片面性和局限性^[2]。另一方面,传统方法一般具有事后性和破坏性,在空间和时间上难以满足快速、实时、精确、无损的诊断要求,难以进行大面积的应用,而随着近年来高光谱遥感技术的发展,应用高光谱遥感手段不仅可以很好的满足植被含水量监测在空间广泛性和时间连续性上的要求,而且能够实现对植被水分状况实时快速准确的诊断。目前,国内外已发展了许多基于高光谱遥感技术监测和估算植被含水量的方法。许多研究表明在近红外(NIR)和短波红外(SWIR)区,有以 970、1200、1450、1930 nm 和 2500 nm 为中心

的 5 个叶片水分吸收带^[3],这一发现为监测和估算叶片含水量提供了可能。Sims 等^[4]经过研究指出 950—970 nm、1150—1260 nm 以及 1520—1540 nm 波段处的反射率与冠层水分相关性较好,尤其在 960 nm 和 1180 nm 处没有大气的干涉,是监测冠层含水量的较佳选择;Carter 等^[5]发现在 1300—2500 nm 范围内,叶片反射率对水分含量的敏感性在 1450、1950 nm 和 2500 nm 波段处达到最大;Shibayama 等^[6]研究表明,用 1190—1320 nm 和 1600 nm 波段反射率的一阶导数可以对双季稻冠层水分是否缺乏进行诊断;田庆久等^[7]基于 Curran 的研究结果,采用光谱归一化方法计算了小麦叶片的光谱吸收特征(吸收峰深度和面积),结果显示小麦叶片的相对含水量与 1450 nm 附近的光谱吸收特征(吸收峰深度和面积)呈显著相关关系;Penuelas 等^[8-9]发现用水分指数 WI($WI = R_{970}/R_{900}$)能清楚地指示水分状况的变化,而且在随后的研究中还发现,WI($WI = R_{900}/R_{970}$)与 NDVI($NDVI = (R_{900} - R_{680}) / (R_{900} + R_{680})$)的比值 WI/NDVI 不仅可以用来预测叶片的水分含量,还可以用来预测植株或冠层的含水量,而且预测精度得到了显著提高;Chen 等^[10]用短波红外波段 1640 nm 和 2130 nm 构建了指数 NDWI₁₆₄₀ 和 NDWI₂₁₃₀,并采用上述指数利用 MODIS 影像来反演玉米的含水量,得到了较为理想的结果;沈艳等^[11]基于光谱指数法,进行了植被叶片及冠层层次的含水量估算,结果表明 Ratio₉₇₅($Ratio_{975} = (2 \times R_{960-990}) / (R_{920-940} + R_{1090-1110})$)是叶片层次估算含水量的普适光谱指数,而用近红外和短波红外波段反射率构造的土壤可调节水分指数 SAWI($SAWI = (R_{820} - R_{1600}) \times (1 + L) / (R_{820} + R_{1600} + L)$,L 为土壤调节系数)可以较为准确的提取冠层层次上的含水量。

然而,应用高光谱遥感技术监测和诊断植被含水量,目前主要集中在水稻、玉米、大豆等种植业大田作物上,在湿地植被含水量估算中的应用研究却比较少见。因此,本研究以北京野鸭湖湿地自然保护区内的湿地植被为研究对象,在野外对其冠层和叶片的光谱反射率进行了测定,在实验室中对其含水量进行了测定。在实测湿地植被冠层和叶片反射光谱的基础上,研究湿地植被冠层和叶片的反射光谱特征,探索湿地植被冠层和叶片的敏感特征波段,并从统计学角度综合分析湿地植被含水量与高光谱参数的关系^[12-17],比较多种光谱参数对含水量的估算效果,以期确立野鸭湖湿地植被含水量的定量监测模型,为遥感技术在野鸭湖湿地植被含水量诊断中的实际应用提供理论依据和技术支持。

1 研究区概况

野鸭湖湿地自然保护区是北京最大的湿地自然保护区,同时也是北京首个湿地鸟类自然保护区,位于北京市延庆县西北部的延庆镇、康庄镇、张山营镇和延庆农场交界处,地理位置处于东经 115°46′16″—115°59′48″,北纬 40°22′04″—40°30′31″,是官厅水库延庆辖区及环湖海拔 479 m 以下淹没区及滩涂组成的次生湿地(图 1)。野鸭湖湿地自然保护区面积 6873 hm²,其中湿地面积达 3939 hm²,超过保护区面积的 50%,土壤类型以褐土为主。保护区地处延怀盆地之延庆部分,属于北京北山隆起区块中的延庆昌平活动断裂区,是北京唯一的山间盆地,地势平坦,四周高,中间低,海拔高度 480—800 m,妫水河自东北向西南贯穿。该区域属北温带大陆性季风气候,四季变化较为明显,气候凉爽,昼夜温差较大,降水主要集中在夏季的 6—8 月份,其中降雨高峰期为 7 月下旬至 8 月上旬^[18]。区域内湿地植被资源丰富,水生植物、湿生植物、中生植物以及盐生植物共有 71 科 213 属 357 种。同时,丰富的湿地植被资源也为水禽和各类鸟类提供了优越的觅食、隐藏及繁殖场所,是候鸟南北迁徙的主要信道,也是珍稀水禽的重要停歇地,具有极其重要的生物多样性保护价值^[18]。

2 数据资料与研究方法

2.1 采样区域与植被类型的选择

由于湿地环境较为复杂,有的区域因为地形地貌的限制难以进入,同时研究区内湿地植被类型众多,因而采样过程中无法覆盖全部区域以及植被类型,所以在进行野外光谱数据采集之前,首先对采样区域以及植被类型进行选择 and 确定。图 1 中区域 1、区域 2、区域 3 三个区域内滩涂面积较大、沟岔众多,湿地植被类型丰富,具有一定的典型性和代表性;区域 4 被人工建造的围堤所包围,围堤内湿地植被生长状况良好,面积较大,也具有一定的典型性与代表性^[18]。而且上述区域内路面情况较好,方便到达,水深较浅,地势平坦,便于开展光谱数据以及植被样本的采集工作。选定采样区域后,结合研究目的和采样区域内湿地植被的类型、数量、长

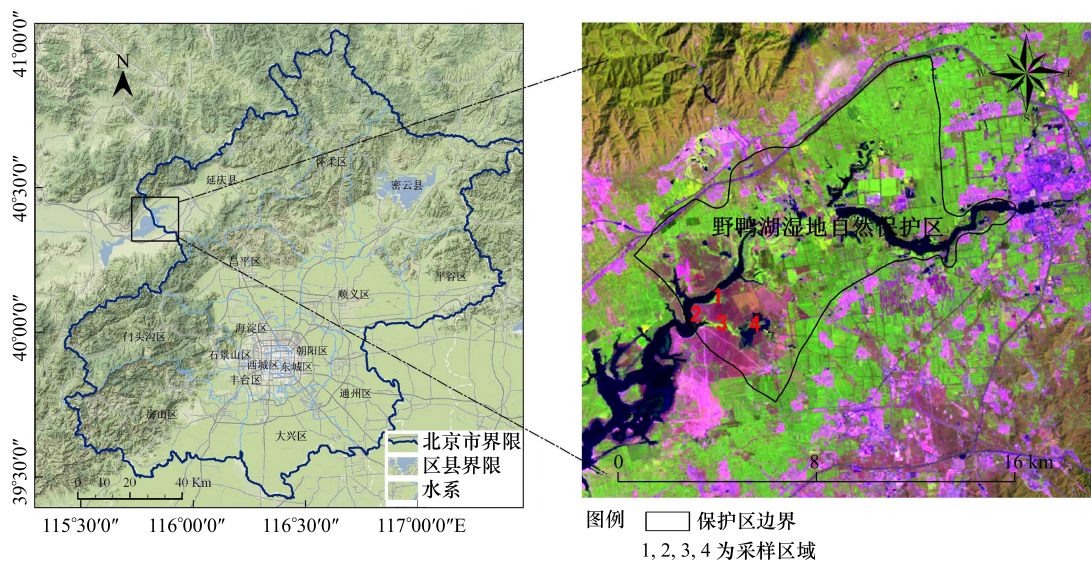


图1 研究区地理位置图

Fig.1 Location map of study area

势以及分布特点,选择样区内的典型湿地植被进行采样,选定的典型湿地植被如表1所示。表1中所选取的7种湿地植被生长旺盛,密度较大,覆盖度较高,在4个采样区域内分布广泛,所占面积达到了采样区域面积的70%—80%。由于浮叶植物与沉水植物浮于水面或生长于水中,受水的影响较大,实验室中测定出的含水量信息不能反映其野外真实情况,为了保证估算模型的精度,决定不对其进行采样。

表1 样区典型湿地植被类型

Table 1 Typical wetland vegetation types of sample area

植物生态类型 Plant ecological types	典型湿地植物 Typical wetland vegetation	平均高度 Average height /cm	覆盖度 Coverage /%	样方个数 Quadrat number	所在区域 Sampling area
挺水植物 Emergent plant	芦苇 <i>Phragmites australis</i>	170	95	3/4	采样区域1、2、3
	香蒲 <i>Typha orientalis</i> Presl.	150	96	3/2	
湿生植物 Hygrophilous plant	球穗莎草 <i>Cyperus globosus</i> All.	70	90	3/3	采样区域1、3、4
	鸢尾 <i>Iris tectorum</i>	50	92	3/3	
中生植物 Mesophyte plant	牛鞭草 <i>Hemarthria sibirica</i> (Gand.) Ohwi	80	93	3/3	采样区域1、2
	苜蓿 <i>Medicago sativa</i> Linn	40	94	3/3	
盐生植物 Halophilous plant	猪毛菜 <i>Salsola collina</i> Pall.	60	91	5	采样区域1、2

2.2 光谱数据的获取和预处理

典型湿地植被冠层与叶片光谱的采集均在野外进行,采样时间分别为2010年7月20日和2010年8月22日,测定采用美国ASD公司的生产的Field Spec 3背挂式野外高光谱辐射仪,光谱采样的波长范围为350—2500 nm,其中350—1000 nm和1000—2500 nm的光谱采样间隔(波段宽)分别为1.4 nm和2 nm,光谱分辨率分别为3 nm和10 nm,数据采样间隔为1 nm,光纤前视场角为25°。所有光谱测定均选择在天气晴朗、无云、无风或者微风的条件下进行,测定时间为每日的10:00—14:00,原因是此时光照条件较好,阳光几乎直射(太阳高度角大于45°)。测量过程中每15 min进行一次白板优化,同时根据天气状况及时进行标准白板优化校正,标准白板的反射率为1,这样所测得的目标光谱是无量纲的相对反射率。测定植被冠层光谱时,应保证测定区域内植被类型单一,植被覆盖度较高,测定时将光谱仪探头垂直向下,根据植被冠层的直径和高度确定探头距离冠层的高度,保证视场可以覆盖冠层。冠层光谱测定完毕后,在所测定的冠层范围内选取健康、生

长良好的叶片进行叶片光谱的测定,测定时应保证叶片水平,叶片表面完全展开,光谱仪探头与叶片表面垂直,避开叶片中部叶脉,并且视场不超出叶片表面范围。每种植被类型测定 5—7 个样点(冠层+叶片),每个样点每次记录 50 条采样光谱曲线。对于叶过于细小(猪毛菜)的植被类型,只测定其冠层光谱。

野外实测地物光谱数据由于受到自然环境、仪器以及目标地物本身光谱特性等多种因素的影响,获取的光谱数据中不仅包含地物光谱信息,而且还包含噪声信息,通过光谱数据的预处理可以消除噪声并且突出地物光谱的某些细微差别。光谱数据的预处理主要包括光谱平滑去噪、水汽吸收波段的剔除和光谱曲线均值处理三部分。

(1) 光谱平滑去噪 由于光谱仪波段间对能量响应上的差异,使得光谱曲线总存在一些噪声,为了得到平稳与概略的变化,需要平滑波形,以去除包含在信号内的少量噪声。本次研究中选用前后 9 个波段的平均值作为滤波后的光谱值,其函数表达式为:

$$R'_i = (R_{i-4} + R_{i-3} + R_{i-2} + R_{i-1} + R_i + R_{i+1} + R_{i+2} + R_{i+3} + R_{i+4})/9 \quad (1)$$

(2) 水汽吸收波段的剔除 由于大气中水汽的强烈吸收,地面光谱在水汽吸收波段基本上都为噪声。在湿地区域内,地表湿度大,空气中水汽含量较高,为了保证光谱数据的精度,需要剔除水汽吸收峰影响严重的波段区域,去除明显错误的波段数值。本次研究中,由于 1350—1450 nm、1800—2000 nm 以及 2350—2500 nm 波段范围内产生的干扰噪音较大,对其进行了剔除处理。

(3) 光谱曲线均值处理 由于每个样点每次采集 50 条光谱曲线,所以对每 10 条曲线进行一次均值运算,均值处理后的 5 条光谱曲线作为每个样点的最终光谱曲线,图 2 为本次研究中选取的典型湿地植被冠层与叶片经过预处理后的光谱曲线。

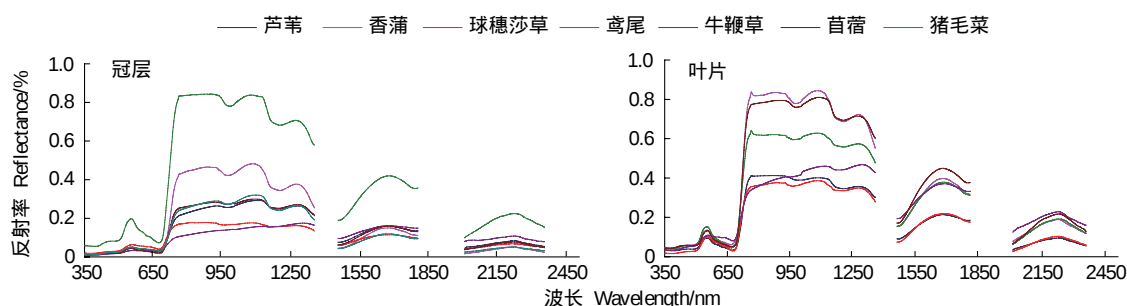


图 2 典型湿地植被光谱曲线

Fig. 2 Spectral curves of typical wetland vegetation

2.3 含水量的测定

为确保采样对象与观测对象的严格一致性,完成对当前目标的光谱测定后,立即对其进行标识,并注明编号。然后在光谱测定组离开 20 min 内,由植被样本采集组进行采样。采样后将植被样本迅速放入采样袋中,然后将采样袋放入冷藏箱中低温保存。植被样本从野外标记取回后,用蒸馏水迅速将样本上的泥土洗去并擦干,置于电子秤上称其鲜重(FW),称重完毕后将植被样本装入牛皮纸信封放入烘箱,以 100—105℃ 杀青 10 min,然后以恒温 40℃ 烘 24—48 h 至恒重,最后称其干重(DW)。

本次研究中,选用相对含水量 RWC(Relative Water Content)^[19]来表征植被含水量。其中,相对含水量测定公式为 $RWC = (FW - DW) / FW (\%)$ 。

2.4 数据分析方法

经过光谱预处理与含水量测定,最终得到 41 个冠层与叶片样点的相对含水量和 205 条典型湿地植被待分析光谱曲线。其中,冠层采样点 23 个,相对含水量数据 23 个,待分析光谱曲线 115 条;叶片采样点 18 个,相对含水量数据 18 个,待分析光谱曲线 90 条。

由于样本数据包含冠层和叶片两部分,为了保证估算模型的准确性和适用性,本次研究中将样本数据分

为两类,样本 1 冠层;样本 2 叶片。从冠层尺度和叶片尺度两方面进行分析。

以上述实测高光谱数据和含水量数据为基础,对选取的典型湿地植被各项光谱参数与含水量进行相关分析,选择与含水量显著相关的光谱参数,并通过逐步回归的分析方法确定监测典型湿地植被的最佳光谱参数,建立估算模型。

采用交叉检验(Cross Validation,CV)中的 K-fold Cross Validation 方法(简称 K-CV)对估算模型进行测试和检验。K-CV 是将原始数据分成 K 组(通常是均分),将每个子集数据分别做一次验证集,其余 K-1 组子集数据作为训练集,得到 K 个模型,用其分类准确率的平均数作为最终检验 K-CV 分类器的性能指标。本次研究中使用的交叉检验方法选择 3K-CV,即将样本数据随机分成 3 组,每组样点数量近似相等,选取其中两组作为训练样本建立估算模型,剩余一组进行验证,如此循环 3 次。估算模型的准确性和适用性采用通用的均方根差(RMSE)、相对误差(RE)和精度(R^2)3 个指标进行评定,并绘制预测值与实测值之间的 1:1 关系图,以直观的展示估算模型的拟合度和可靠性。其中 3K-CV 取 3 次验证的判定系数的平均值作为该模型的精度。

3 结果与分析

3.1 典型湿地植被叶冠尺度含水量变化特征

在冠层和叶片两种尺度下,各个尺度上的相对含水量表现出了较为明显的变化。两种尺度下相对含水量的变化范围分别达到了 42.5%—77.8%、49.3%—79.2%;变异系数分别为 0.167、0.112(表 2),变异系数较大,表明样本数据具有良好的代表性。

表 2 冠层和叶片尺度上相对含水量的变化

Table 2 Change of relative water content in canopy and leaf					
样本类型 Sample category	最小值 Min/%	最大值 Max/%	平均值 Mean/%	标准差 SD	变异系数 CV
样本 1:冠层 Sample 1:canopy	42.5	77.8	63.5	0.106	0.167
样本 2:叶片 Sample 2:leaf	49.3	79.2	67.7	0.076	0.112

3.2 不同含水量水平对典型湿地植被光谱的影响

植物的反射光谱,随着叶片内叶肉细胞、叶绿素、水分含量、氮素含量以及其他生物化学成分的不同,在不同波段会呈现出不同的形态和特征的反射光谱曲线^[20]。叶片也是植被冠层的重要组成部分,叶片与光辐射的相互作用会对冠层光谱产生较为直接的影响。因此,含水量的多少势必会影响植被冠层与叶片的反射光谱。

以芦苇冠层和叶片的光谱反射率为例说明不同含水量水平下芦苇冠层和叶片光谱反射率的响应模式。图 3 分别为芦苇冠层和叶片在不同含水量水平下的反射光谱曲线比较。从图 3 可以看出,含水量水平的差异对芦苇冠层和叶片的光谱特征有着较为显著的影响,不同波段区域的光谱响应不同,并且芦苇冠层和叶片反

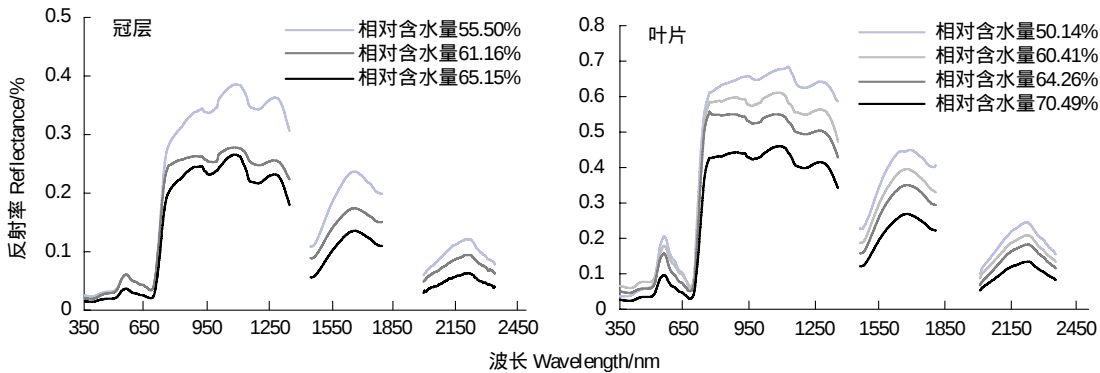


图 3 不同相对含水量水平冠层和叶片光谱反射率的变化
Fig. 3 Spectral curves in different relative water content levels

射光谱曲线的形状以及在不同含水量水平下的变化趋势基本相同,随着含水量水平的增加,冠层与叶片光谱在可见光波段(350—760 nm)与红外波段(760—2500 nm)的反射率均逐渐降低。其中在波长为 390 nm 的蓝光、480 nm 的蓝青光和 660 nm 红光附近,不同含水量水平的芦苇表现为 3 个吸收谷,而在 540 nm 的绿光附近反射率增加,形成一个明显的反射峰。在 700 nm 附近,其反射率骤然上升,在近红外 760—1300 nm 之间呈现为较为强烈的反射,形成一个明显的反射高台,反射率在冠层尺度上最高达到 0.38 左右,叶片尺度上最高可达 0.68 左右,其中又分别表现为 950 nm、1160 nm 附近的两个相对吸收谷和 1060 nm、1260 nm 附近的两个反射峰。在 1350 nm 以后不同含水量水平芦苇的反射率明显跌落,呈现出 1650 nm 附近和 2200 nm 附近两个相对反射峰。

3.3 基于“三边”参数的叶冠尺度湿地植被含水量估算模型

“三边”参数能够较好的反映绿色植被的光谱特征,对含水量的变化较为敏感,可以作为含水量的诊断特征。利用与“三边”参数有关的 18 个光谱特征变量与不同尺度下的含水量进行相关性分析,表 3 为“三边”参数的定义。

表 3 “三边”参数的定义

Table 3 Definition of trilateral parameters

类型 Type	“三边”参数 Trilateral parameters	定义 Definition
基于光谱位置的变量 Characteristic variable based on spectral position	Dr	红边(680—760nm)内最大一阶微分值
	WP_r	Dr 对应的波长即红边位置
	Db	蓝边(490—530nm)内最大一阶微分值
	WP_b	Db 对应的波长即蓝边位置
	Dy	黄边(560—640nm)内最大一阶微分值
	WP_y	Dy 对应的波长即黄边位置
	Rg	绿峰反射率:510—560nm 范围内最大的波段反射率
	WP_g	Rg 对应的波长
基于光谱面积的变量 Characteristic variable based on spectral area	Ro	红谷反射率:640—680nm 范围内最小的波段反射率
	SDr	红边内一阶微分的总和
	SDb	蓝边内一阶微分的总和
基于植被指数形式的变量 Characteristic variable based on vegetation index	SDy	黄边内一阶微分的总和
	SDr/SDb	红边内一阶微分总和与蓝边内一阶微分总和的比值
	SDr/SDy	红边内一阶微分总和与黄边内一阶微分总和的比值
	Rg/Ro	绿峰反射率与红谷反射率的比值
	(SDr-SDb)/(SDr+SDb)	红边内一阶微分总和与蓝边内一阶微分总和的归一化值
	(SDr-SDy)/(SDr+SDy)	红边内一阶微分总和与黄边内一阶微分总和的归一化值
	(Rg-Ro)/(Rg+Ro)	绿峰反射率与红谷反射率的归一化值

从表 4 可以看出,不同尺度含水量与“三边”参数整体上相关性较好,呈极显著相关,相关系数最大达到了 0.906。基于光谱位置的变量中,对于样本 1,除了红边位置(WP_r)与其相关性没有达到极显著之外,其余变量与含水量均呈极显著相关,其中黄边幅值(Dy)与含水量的相关系数达到-0.821,呈极显著的负相关;对于样本 2,除了蓝边位置(WP_b)、黄边位置(WP_y)以及红光吸收谷(Ro)与其相关性没有达到极显著之外,其余变量与含水量均呈极显著相关,其中红边幅值(Dr)与含水量的相关系数达到 0.892,呈极显著的正相关。基于光谱面积的变量中,“三边”面积与不同尺度含水量具有较强的相关性,均呈极显著相关,样本 1,黄边面积(SDy)与其相关性最强,相关系数达到-0.877,呈极显著的负相关;样本 2,红边面积(SDr)与其相关性最强,相关系数达到 0.906,呈极显著的正相关。基于植被指数形式的变量中,红边面积(SDr)与黄边面积(SDy)构建的归一化植被指数与样本 1 相关性最强,相关系数达到 0.781,呈极显著的正相关;红边面积(SDr)与黄边面积(SDy)构建的比值植被指数与样本 2 的相关性最强,相关系数达到 0.619,呈极显著的正相关。

表 4 不同尺度含水量与“三边”参数的相关系数

Table 4 Correlation coefficient between water content and trilateral parameters in different scales			
类型 Type	“三边”参数 Trilateral parameters	样本 1:冠层 Sample1:canopy	样本 2:叶片 Sample2:leaf
基于光谱位置的变量 Characteristic variable based on spectral position	Dr	0.789 **	0.892 **
	WP_r	0.256 *	0.403 **
	Db	0.799 **	0.822 **
	WP_b	0.469 **	0.268 *
	Dy	-0.821 **	-0.796 **
	WP_y	0.585 **	-0.033
	Rg	0.635 **	0.491 **
	WP_g	0.452 **	0.362 **
	Ro	0.381 **	0.247 *
	SDr	0.784 **	0.906 **
基于光谱面积的变量 Characteristic variable based on spectral area	SDb	0.770 **	0.801 **
	SDy	-0.877 **	-0.846 **
	SDr/SDb	-0.157	0.081
基于植被指数形式的变量 Characteristic variable based on vegetation index	SDr/SDy	0.064	0.619 **
	Rg/Ro	0.439 **	0.397 **
	(SDr-SDb)/(SDr+SDb)	-0.147	0.120
	(SDr-SDy)/(SDr+SDy)	0.781 **	0.536 **
	(Rg-Ro)/(Rg+Ro)	0.583 **	0.519 **

* 表示在 0.05 水平上显著; ** 表示在 0.01 水平上极显著; 样本 1: n=115; 样本 2: n=90

由于不同尺度含水量与“三边”参数具有较好的相关性,说明采用这些光谱特征变量对冠层尺度和叶片尺度下典型湿地植被含水量进行估算具有较高的可行性,因此采用交叉检验的方法(3K-CV)进行估算模型的建立和验证。选取每种样本中相关系数最大的光谱特征参数为自变量(样本 1:黄边面积 SDy,样本 2:红边面积 SDr),以含水量为因变量,进行单变量线性与非线性(二次多项式、指数)回归分析,并根据 R^2 最大优选原则和光谱特征参数与含水量的散点关系图选取最佳的估算模型。由表 5 可以看出,对于样本 1,二次多项式模型的判定系数(R^2)最大;对于样本 2,线性模型的判定系数(R^2)最大,所以根据 R^2 最大原则,样本 1 冠层的含水量估算模型为 $y=-9.462x^2-2.671x+0.608$,样本 2 叶片的含水量估算模型为 $y=0.562x+0.376$ 。图 4 为每种样本光谱特征参数与含水量的散点关系图及其最佳估算模型。

表 5 不同尺度含水量与最优“三边”参数回归模型

Table 5 Regression model between water content and best trilateral parameters in different scales			
样本类型 Sample category	光谱特征参数 Spectral parameters(x)	回归方程 Regression equation	R^2
样本 1:冠层 Sample 1:canopy	黄边面积 SDy	$y=-2.064x+0.605$	0.770
		$y=-9.462x^2-2.671x+0.608$	0.796
		$y=0.601e^{-3.197x}$	0.744
		$y=0.562x+0.376$	0.821
样本 2:叶片 Sample 2:leaf	红边面积 SDr	$y=0.096x^2+0.471x+0.395$	0.791
		$y=0.418e^{0.887x}$	0.783

样本 1: n=76; 样本 2: n=60

建立最佳估算模型后,为了检验估算模型的可靠性和适用性,采用通用的均方根差(RMSE)、相对误差(RE)和精度(R^2)3个指标对估算模型进行评定(表 6),并绘制预测值与实测值之间的 1:1 关系图(图 5),以直观的展示估算模型的拟合度和可靠性。

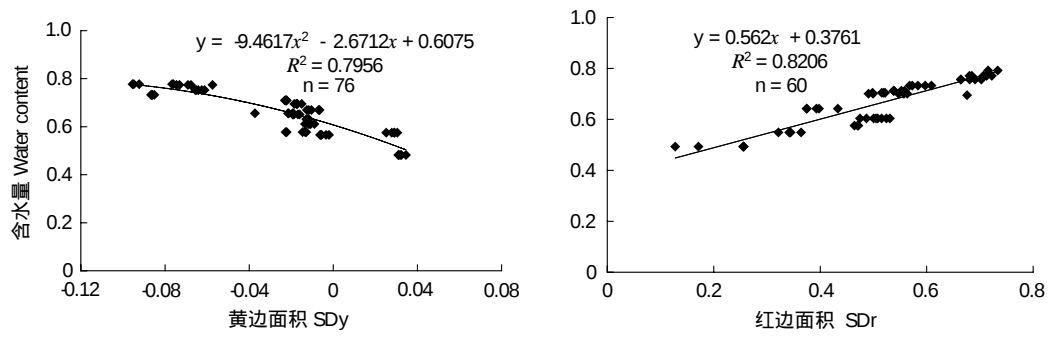


图 4 最优“三边”参数与不同尺度含水量的关系

Fig. 4 Regression relationship between water content and best trilateral parameters

表 6 不同尺度含水量实测值(x)与预测值(y)拟合评定指标

Table 6 The fit evaluation indicators of the measured values (x) and predicted values (y) in different scales

样本类型 Sample category	光谱特征参数 Spectral parameters	回归方程 Regression equation	R^2	RMSE	RE/%
样本 1:冠层 Sample 1: canopy	黄边面积 SDy	$y=0.9511x+0.0346$	0.811	0.0364	5.08
样本 2:叶片 Sample 2: leaf	红边面积 SDr	$y=0.9332x+0.0356$	0.849	0.0330	3.14

样本 1: $n=39$; 样本 2: $n=30$

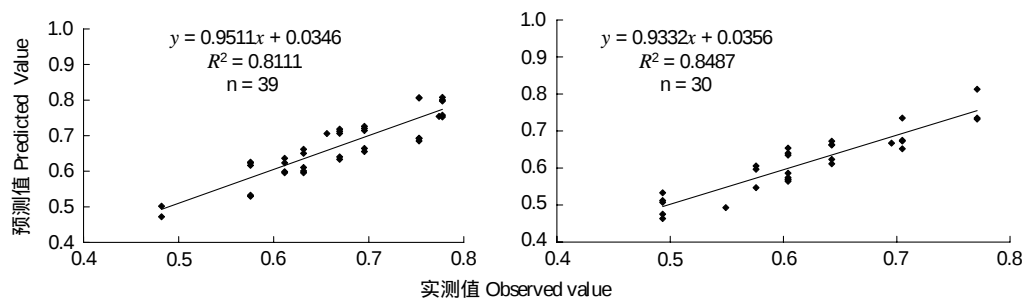


图 5 不同尺度含水量实测值和预测值比较(“三边”参数)

Fig. 5 Comparison between the measured value and the predicted value in different scales(trilateral parameters)

检验结果表明,基于 2 个光谱特征参数建立的不同尺度含水量估算模型,均取得了较好的测试效果,检验拟合方程的决定系数(R^2)均达到了 0.8 以上,均方根差(RMSE)和相对误差(RE)均较小,具有较高的拟合精度和较小的相对误差。其中以红边面积(SDr)为自变量构建的叶片尺度含水量估算模型具有最大的决定系数($R^2 = 0.849$)、最小的均方根差(RMSE = 0.0330)和最小的相对误差(RE = 3.14%),预测精度达到了 96.86%。

3.4 基于高光谱植被指数的叶冠尺度湿地植被含水量估算模型

植被的光谱特征与其他地物的区别较为明显,各个波段的光谱特性差异也较为明显。高光谱植被指数通常选取对绿色植被强吸收的可见光波段和对绿色植被高反射的近红外波段。可见光波段和近红外波段是绿色植被的敏感波段,两者对同一生物物理现象的光谱响应反差明显,并且高光谱植被指数还可以消除土壤、大气等背景信息的影响,因此可以利用高光谱植被指数对绿色植被的含水量进行诊断。利用与高光谱植被指数有关的 13 个光谱特征变量与不同尺度下的含水量进行相关性分析,表 7 为高光谱植被指数的定义。

从表 8 可以看出,不同尺度含水量与高光谱植被指数整体上相关性较好,均呈极显著相关,相关系数最小为 0.455,最大达到了 0.919。可见光波段组合中,RVSI 和 PRI[531,570]与不同尺度含水量均呈极显著相关,但相关系数相对较小。近、中红外波段组合中,高光谱指数与不同尺度含水量具有较强的相关性,均呈极

显著相关,样本 1,SRWI 与其相关性最强,相关系数分别达到 0.919,呈极显著的正相关;样本 2,WI 与其相关性最强,相关系数达到 0.891,呈极显著的正相关。可见光、红外波段组合中,DSWI 与不同尺度含水量也呈现出较强的相关性,均呈极显著相关。

表 7 高光谱参数的定义

Table 7 Definition of hyperspectral parameters

类型 Type	高光谱参数 Hyperspectral parameters	定义 Definition
可见光波段组合 Visible band combination	RVSI, Red-Edge Vegetation Stress Index	$[(R_{712} + R_{752})/2] - R_{732}$
近、中红外波段组合 Near and middle infrared band combination	PRI, Photochemical/Physiological Reflectance Index	$(R_{531} - R_{570}) / (R_{531} + R_{570})$
	MSI, Moisture Stress Index	R_{1600} / R_{819}
	RVI_{hyp} , Hyperspectral Ratio VI	R_{1088} / R_{1148}
	SRWI, Simple Ratio Water Index	R_{860} / R_{1240}
	WI, Water Index	R_{900} / R_{970}
	LWVI-1, Leaf Water VI 1	$(R_{1094} - R_{893}) / (R_{1094} + R_{893})$
	LWVI-2, Leaf Water VI 2	$(R_{1094} - R_{1205}) / (R_{1094} + R_{1205})$
	NDII, Normalized Difference Infrared Index	$(R_{819} - R_{1600}) / (R_{819} + R_{1600})$
	NDWI, ND Water Index	$(R_{860} - R_{1240}) / (R_{860} + R_{1240})$
	SIWSI, Shortwave Infrared Water Stress Index	$(R_{860} - R_{1640}) / (R_{860} + R_{1640})$
	PVI_{hyp} , Hyperspectral Perpendicular VI	$(R_{1148} - aR_{807} - b) / (1 + a^2)^{1/2}$, $a = 1.17$, $b = 3.37$
可见光、红外波段组合 Visible and infrared band combination	DSWI, Disease Water Stress Index	$(R_{802} + R_{547}) / (R_{1657} + R_{682})$

$RVSI^{[21]}$, $PRI^{[22]}$, $MSI^{[23]}$, $RVI_{hyp}^{[24]}$, $SRWI^{[25]}$, $WI^{[8]}$, $WLVI-1^{[26]}$, $WLVI-2^{[26]}$, $NDII^{[27]}$, $NDWI^{[28]}$, $SIWSI^{[29]}$, $PVI_{hyp}^{[24]}$, $DSWI^{[26]}$

表 8 不同尺度含水量与高光谱植被指数的相关系数

Table 8 Correlation coefficient between water content and hyperspectral vegetation index in different scales

类型 Type	高光谱参数 Hyperspectral parameters	样本 1:冠层 Sample1: canopy	样本 2:叶片 Sample2: leaf
可见光波段组合 Visible band combination	RVSI	-0.549 **	-0.518 **
近、中红外波段组合 Near and middle infrared band combination	$PRI[531, 570]$	0.554 **	0.455 **
	MSI	-0.777 **	-0.778 **
	RVI_{hyp}	0.682 **	0.808 **
	SRWI	0.919 **	0.826 **
	WI	0.910 **	0.891 **
	$WLVI-1[1094, 893]$	-0.890 **	-0.552 **
	$WLVI-2[1094, 1205]$	0.663 **	0.791 **
	$NDII[819, 1600]$	0.807 **	0.794 **
	$NDWI[860, 1240]$	0.915 **	0.812 **
	$SIWSI[860, 1640]$	0.789 **	0.791 **
	PVI_{hyp}	-0.763 **	-0.748 **
可见光、红外波段组合 Visible and infrared band combination	DSWI	0.861 **	0.757 **

* 表示在 0.05 水平上显著; ** 表示在 0.01 水平上极显著; 样本 1: $n=115$; 样本 2: $n=90$

由于不同尺度含水量与高光谱植被指数具有较好的相关性,说明采用这些光谱特征变量对冠层尺度和叶片尺度下典型湿地植被含水量进行估算具有较高的可行性,因此采用交叉检验的方法(3K-CV)进行估算模型的建立和验证。选取每种样本中相关系数最大的光谱特征参数为自变量(样本 1:SRWI,样本 2:WI),以含水量为因变量,进行单变量线性与非线性(二次多项式、指数)回归分析,并根据 R^2 最大优选原则和光谱特征参

数与含水量的散点关系图选取最佳的估算模型。由表 9 可以看出,对于样本 1,指数模型的判定系数(R^2)最大;对于样本 2,二次多项式模型的判定系数(R^2)最大。所以,根据 R^2 最大原则,样本 1 的冠层的含水量估算模型为 $y=0.219e^{1.010x}$;样本 2 的叶片的含水量估算模型为 $y=2.028x^2-0.476x-1.009$ 。图 6 为每种样本光谱特征参数与含水量的散点关系图及其最佳估算模型。

表 9 不同尺度含水量与最优高光谱植被指数回归模型

Table 9 Regression model between water content and best hyperspectral vegetation index in different scales			
样本类型 Sample category	光谱特征参数(x) Spectral parameters(x)	回归方程 Regression equation	R^2
样本 1:冠层 Sample 1:canopy	SRWI	$y=0.608x+0.002$	0.814
		$y=-0.051x^2+0.712x-0.049$	0.815
		$y=0.219e^{1.010x}$	0.849
样本 2:叶片 Sample 2:leaf	WI	$y=3.717x-3.175$	0.794
		$y=2.028x^2-0.477x-1.009$	0.795
		$y=0.002e^{5.674x}$	0.793

样本 1: $n=76$;样本 2: $n=60$

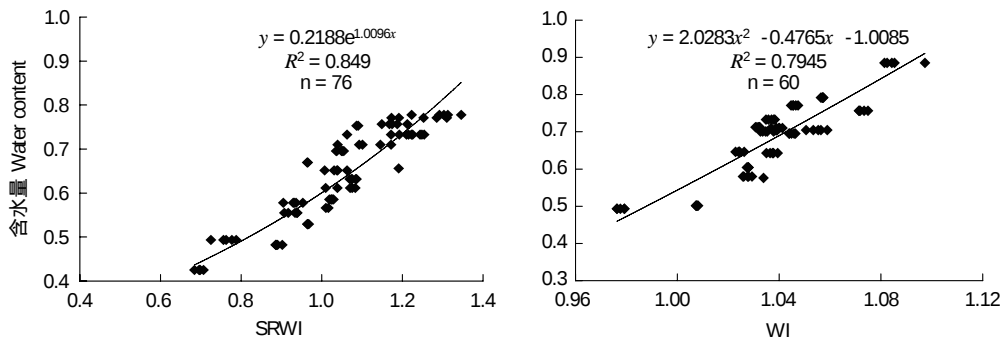


图 6 最优高光谱植被指数与不同尺度含水量的关系

Fig. 6 Regression relationship between water content and best hyperspectral vegetation index

建立最佳估算模型后,为了检验估算模型的可靠性和适用性,采用通用的均方根差(RMSE)、相对误差(RE)和精度(R^2)3个指标对估算模型进行评定(表 10),并绘制预测值与实测值之间的 1:1 关系图(图 7),以直观的展示估算模型的拟合度和可靠性。

表 10 不同尺度含水量实测值(x)与预测值(y)拟合评定指标

Table 10 The fit evaluation indicators of the measured values(x) and predicted values(y) in different scales					
样本类型 Sample category	光谱特征参数 Spectral parameters	回归方程 Regression equation	R^2	RMSE	RE/%
样本 1:冠层 Sample 1:canopy	SRWI	$y=0.9702x+0.0161$	0.922	0.0312	2.94
样本 2:叶片 Sample 2:leaf	WI	$y=0.9125x+0.0560$	0.869	0.0354	3.36

样本 1: $n=39$;样本 2: $n=30$

检验结果表明,基于 2 个光谱特征参数建立的不同尺度含水量估算模型,均取得了较好的测试效果,检验拟合方程的决定系数(R^2)均达到了 0.86 以上,均方根差(RMSE)和相对误差(RE)均较小,具有较高的拟合精度和较小的相对误差。其中以 SRWI 为自变量构建的冠层尺度含水量估算模型具有最大的决定系数($R^2=0.922$)、最小的均方根差(RMSE = 0.0312)和最小的相对误差(RE = 2.94%),预测精度达到了 97.06%。

4 结论与讨论

本次研究采用野鸭湖典型湿地植被冠层和叶片野外实测光谱及其室内实测含水量数据,利用相关分析与逐步回归分析的统计学分析方法,通过对选取的典型湿地植被各项光谱特征参数与不同尺度下的含水量数据

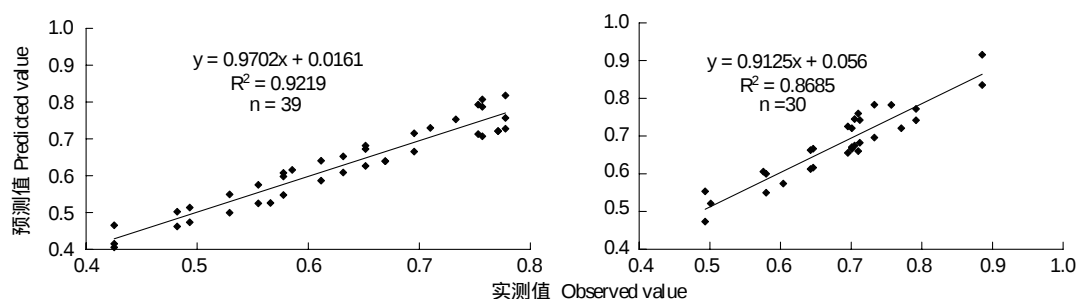


图7 不同尺度含水量实测值和预测值比较(高光谱指数)

Fig. 7 Comparison between the measured value and the predicted value in different scales (hyperspectral vegetation index)

进行系统分析,确定了监测典型湿地植被的最佳光谱特征参数,建立了冠层和叶片尺度下的含水量估算模型,并采用交叉检验中的3K-CV方法对估算模型进行了测试和检验。结论如下:

(1)以芦苇为例初步探明了不同含水量水平下典型湿地植被冠层和叶片光谱反射率的响应模式。含水量水平影响冠层和叶片的光谱反射特征,并且不同波段区域的光谱响应不同。随着含水量水平的增加,冠层与叶片光谱在可见光波段(350—760 nm)和红外波段(760—2500 nm)的反射率均逐渐降低。

(2)不同尺度含水量与选取的光谱特征参数整体上相关性较强,与“三边”参数基本上都呈极显著相关,相关系数最大达到0.906;与高光谱指数全部呈极显著相关,相关系数最小为0.455,最大达到0.919,说明采用这些光谱特征变量对冠层尺度和叶片尺度下典型湿地植被含水量进行估算具有较高的可行性。通过选取不同尺度上相关性最佳的光谱特征参数,分别基于“三边”参数和高光谱植被指数构建了不同尺度下的含水量估算模型。其中,黄边面积(SD_y)与SRWI(Simple Ratio Water Index)对冠层尺度含水量的估算效果最好,估算模型分别为 $y = -9.462x^2 - 2.671x + 0.608$ 和 $y = 0.219e^{1.010x}$;红边面积(SD_r)与WI(Water Index)对叶片尺度含水量的估算效果最好,估算模型分别为 $y = 0.562x + 0.376$ 和 $y = 2.028x^2 - 0.476x - 1.009$ 。

(3)本次研究中一方面将样本数据分为两类,从冠层和叶片两种尺度上构建含水量估算模型,另一方面估算模型采用交叉检验中的3K-CV方法进行测试和检验,3K-CV方法可以充分利用样本数据,有效的避免过学习以及欠学习状态的发生,得到的结果也更具有说服力。以上两方面较大的增强了模型的可靠性和普适性。通过测试和检验,不同尺度下的含水量估算模型均取得了较为理想的预测精度,预测精度的最小值为94.92%,最大值为97.06%,为遥感技术在野鸭湖湿地植被含水量诊断中的实际应用提供理论依据和技术支持。

(4)本次研究采用高光谱遥感分析估算湿地植被含水量,该方法属于一种无损测试技术,即在不破坏植物体本身组织结构的前提下,利用高光谱辐射仪测得的冠层和叶片含水量光谱反射特征变化。与传统的室内生理生化分析方法相比,遥感方法不仅是活体观测,而且获得的是“面源”信息,使分析成本大大降低,而且使分析的效率得到了明显提高。研究中还发现,高光谱植被指数与含水量拟合方程的拟合度相对高于“三边”参数与之建立方程的拟合度,说明多波段组合的光谱特征参数更适合含水量的判别,这与Daughtry等^[30]研究的结果是相一致的,原因可能是单一波段光谱反射率或其变换形式容易被背景反射或者叶面积指数的变异所混淆和干扰。

(5)本文中的高光谱植被指数均是前人给出的,其研究波段相对较窄,容易导致其他同样具有良好估算效果的光谱指数的丢失。在下一步研究中,需要进一步系统的分析350—2500 nm范围内任意单波段或者两波段组合而成的比值(SD)和归一化(ND)光谱指数与含水量的关系,进一步提高估算模型的可靠性和准确性。另一方面,本次研究中利用光谱仪探头直接测定植被叶片光谱,所测定的植被叶片光谱仅针对单层叶片,势必会受到土壤、水汽等背景信息的影响,虽然经过了平滑、去噪、“三边”参数以及高光谱植被指数等处理,但只是消除了部分背景噪音的影响,植被叶片的光谱特征仍然会被削弱,从而降低了模型的普适性和可靠性。

因此,在下一步的研究中,最好使用 ASD 光谱仪自带的手持叶夹式叶片光谱探测器测定植被叶片光谱,该探测器内置石英卤化灯,光源稳定,而且由于是内置光源,使用时不受天气的影响,易于在不同条件下进行大范围的多点测量。该探测器在测量时将叶片放置于叶片夹的叶室中,然后将叶片夹紧,保证了叶片水平且被探测面积相同,能够较大程度的消除背景信息、叶片表面弯曲造成的光谱波动以及叶片内部变异造成的影响,获取的植被叶片光谱精度较高,因而能够进一步增强估算模型的可靠性与普适性。

References:

- [1] Zhang J H, Xu Y, Yao F M, Wang P J, Guo W J, Li L, Yang L M. Progress of vegetation water content estimation by optical remote sensing. *Science China(Technological Sciences)*, 2010, 40(10): 1121-1129.
- [2] Li Y X, Yang W N, Tong L, Jian J, Gu X F. Remote sensing quantitative monitoring and analysis of fuel moisture content based on spectral index. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(5): 1403-1407.
- [3] Zhang J H, Guo W J. Quantitative retrieval of crop water content under different soil moistures levels. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 2006.
- [4] Sims D A, Gamon J A. Estimation of vegetation water content and photosynthetic tissue area from spectral reflectance: a comparison of indices based on liquid water and chlorophyll absorption features. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 84(9): 526-537.
- [5] Carter G A. Primary and secondary effects of water content on the spectral reflectance of leaves. *American Journal of Botany*, 1991, 78(7): 919-924.
- [6] Shibayama M, Takahashi W, Morinaga S, Akiyama T. Canopy water deficit detection in paddy rice using a high-resolution field spectro-radiometer. *Remote Sensing of Environment*, 1993, 45(2): 117-126.
- [7] Tian Q J, Gong P, Zhao C J, Guo X W. A feasibility study on diagnosing wheat water status using spectral reflectance. *Chinese Science Bulletin*, 2001, 46(8): 666-669.
- [8] Peñuelas J, Filella I, Biel C, Serrano L, Savé R. The reflectance at the 950—970 nm region as an indicator of plant water status. *International Journal of Remote Sensing*, 1993, 14(10): 1887-1905.
- [9] Penuelas J, Pinol J, Ogaya R, Filella I. Estimation of plant water concentration by the reflectance water index WI (R900/R970). *International Journal of Remote Sensing*, 1997, 18(13): 2869-2875.
- [10] Chen D Y, Huang J F, Jackson T J. Vegetation water content estimation for corn and soybeans using spectral indices derived from MODIS near-and short-wave infrared bands. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 98(2/3): 225-236.
- [11] Shen Y, Niu Z, Yan C Y. Estimation models for vegetation water content at both leaf and canopy levels. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(7): 1218-1223.
- [12] Li B Z, Li M X, Zhou X, Zhang L S, Zhang H Y. Hyperspectral estimation models for nitrogen contents of apple leaves. *Journal of Remote Sensing*, 2010, 14(4): 767-780.
- [13] Song X D, Jiang H, Yu S Q, Zhou G M, Chang J, Jiang Z S, Jiang B. Relationship between chlorophyll concentrations and spectral reflectance feature of the typical evergreen hardwood species in subtropical region of China. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(5): 1959-1963.
- [14] Yang J, Tian Y C, Yao X, Cao W X, Zhang Y S, Zhu Y. Hyperspectral estimation model for chlorophyll concentrations in top leaves of rice. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(12): 6561-6571.
- [15] Lei T, Zhao G X, Zhu X C, Dong C, Meng Y, Zhan B. Canopy spectral features and fruit amount estimation of apple tree at fruit stage based on hyperspectral data. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(9): 2276-2285.
- [16] Liu L, Shen R P, Ding G X. Studies on the estimation of soil organic matter content based on hyper-spectrum. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, 31(3): 762-766.
- [17] Chen B, Li S K, Wang K R, Wang F Y, Xiao C H, Pan W C. Study on hyperspectral estimation of pigment contents in leaves of cotton under disease stress. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(2): 421-425.
- [18] Chen W, Hu D, Fu B Q, Gong Z N, Gao W, Hong J M, Du G S. *Studies on Biological Diversity of Wetland in Beijing*. Beijing: Science Press, 2007: 47-54.
- [19] Inoue Y, Morinaga S, Shibayama M. Non-destructive estimation of water status of intact crop leaves based on spectral reflectance measurements. *Japan Journal of Crop Science*, 1993, 62(3): 462-469.
- [20] Wang J H, Zhao C J, Huang W J. *Fundamentals and Applications of Quantitative Remote Sensing in Agriculture*. Beijing: Science Press, 2008: 4-5.

- [21] Merton R N. Monitoring community hysteresis using spectral shift analysis and the red-edge vegetation stress index. *Proceedings of the Seventh annual JPL Airborne Earth Science Workshop*. Pasadena: NASA, Jet Propulsion Laboratory, 1998, 2: 12-16.
- [22] Thenot F, Méthy M, Winkel T. The photochemical reflectance index (PRI) as a water-stress index. *International Journal of Remote Sensing*, 2002, 23(23): 5135-5139.
- [23] Ceccato P, Flasse S, Tarantola S, Jacquemoud S, Grégoire J M. Detecting vegetation leaf water content using reflectance in the optical domain. *Remote Sensing of Environment*, 2001, 77(1): 22-33.
- [24] Schlerf M, Atzberger C, Hill J. Remote sensing of forest biophysical variables using HyMap imaging spectrometer data. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 95(2): 177-194.
- [25] Zarco-Tejada P J, Rueda C A, Ustin S L. Water content estimation in vegetation with MODIS reflectance data and model inversion methods. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 85(1): 109-124.
- [26] Galvão L S, Formaggio A R, Tisot D A. Discrimination of sugarcane varieties in Southeastern Brazil with EO-1 Hyperion data. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 94(4): 523-534.
- [27] Hardinsky M A, Lemas V, Smart R M. The influence of soil salinity, growth form and leaf moisture on the spectral reflectance of *Spartina alternifolia* canopies. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1983, 49(1): 77-83.
- [28] Gao B C. NDWI-A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 1996, 58(3): 257-266.
- [29] Fensholt R, Sandholt I. Derivation of a shortwave infrared water stress index from MODIS near- and shortwave infrared data in a semiarid environment. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 87(1): 111-121.
- [30] Daughtry C S T, Walthall C L, Kin M S, de Colstoun E B, McMurtrey J E III. Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 2000, 74(2): 229-239.

参考文献:

- [1] 张佳华, 许云, 姚凤梅, 王培娟, 郭文娟, 李莉, Yang L M. 植被含水量光学遥感估算方法研究进展. *中国科学(技术科学)*, 2010, 40(10): 1121-1129.
- [2] 李玉霞, 杨武年, 童玲, 简季, 顾行发. 基于光谱指数法的植被含水量遥感定量监测及分析. *光学学报*, 2009, 29(5): 1403-1407.
- [7] 田庆久, 宫鹏, 赵春江, 郭晓维. 用光谱反射率诊断小麦水分状况的可行性分析. *科学通报*, 2001, 46(8): 666-669.
- [11] 沈艳, 牛铮, 颜春燕. 植被叶片及冠层层次含水量估算模型的建立. *应用生态学报*, 2005, 16(7): 1218-1223.
- [12] 李丙智, 李敏夏, 周璇, 张林森, 张海燕. 苹果树叶片全氮含量高光谱估算模型研究. *遥感学报*, 2010, 14(4): 767-780.
- [13] 宋晓东, 江洪, 余树全, 周国模, 常杰, 江子山, 江波. 亚热带典型常绿阔叶树种叶片叶绿素含量与其高光谱特征间的关系. *生态学报*, 2008, 28(5): 1959-1963.
- [14] 杨杰, 田永超, 姚霞, 曹卫星, 张玉森, 朱艳. 水稻上部叶片叶绿素含量的高光谱估算模型. *生态学报*, 2009, 29(12): 6561-6571.
- [15] 雷彤, 赵庚星, 朱西存, 董超, 孟岩, 战冰. 基于高光谱的苹果果期冠层光谱特征及其果量估测. *生态学报*, 2010, 30(9): 2276-2285.
- [16] 刘磊, 沈润平, 丁国香. 基于高光谱的土壤有机质含量估算研究. *光谱学与光谱分析*, 2011, 31(3): 762-766.
- [17] 陈兵, 李少昆, 王克如, 王方永, 肖春华, 潘文超. 病害胁迫下棉花叶片色素含量高光谱遥感估测研究. *光谱学与光谱分析*, 2010, 30(2): 421-425.
- [18] 陈卫, 胡东, 付必谦, 宫兆宁, 高武, 洪剑明, 杜桂森. 北京湿地生物多样性研究. 北京: 科学出版社, 2007: 47-54.
- [20] 王纪华, 赵春江, 黄文江. 农业定量遥感基础与应用. 北京: 科学出版社, 2008: 4-5.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 31, No. 22 November, 2011 (Semimonthly)

CONTENTS

Hyperspectral estimation models for plant community water content at both leaf and canopy levels in Wild Duck Lake wetland	6645
Potential distribution of rice in china and its climate characteristics	6659
Effects of seed soaking with soybean isoflavones on soybean seedlings under salt stress	6669
Ecophysiological responses and adaptation of <i>Tamarix ramosissima</i> to changes in groundwater depth in the Heihe river basin	6677
<i>Melica przewalskyi</i> population spatial pattern and response to soil moisture in degraded alpine grassland	6688
A study on ecological compensation standard for Zaoshi Water Conservancy Project based on the idea of ecological footprint	6696
Spatial-temporal variation of NPP and NDVI correlation in wetland of Yellow River Delta based on MODIS data	6708
Marshclassification mapping at a community scale using high-resolution imagery	6717
The impact of bacterial-feeding nematodes on root growth of <i>Arabidopsis thaliana</i> L. and the possible mechanisms	6727
Spatial and dynamic analysis of plantations in Xishuangbanna using network <i>K</i> -function	6734
Contrastive analysis and climatic response of tree-ring gray values and tree-ring densities	6743
Fractal structure of dominant tree species in north-facing slope of mountain of northern Hebei	6753
Characteristics of radiation fluxes of an evergreen broad-leaved forest in Maofeng Mountain, Guangzhou, China	6766
Effects of seed-dressing agents on groundnut and rhizosphere microbes	6777
Time series prediction of the concentration of chlorophyll-a based on RBF neural network with parameters self-optimizing	6788
A trend surface analysis of geographic variation in the traits of seeds and seedlings from different <i>Quercus acutissima</i> provenances	6796
Comparisons of relationships between leaf and fine root traits in hilly area of the Loess Plateau, Yanhe River basin, Shaanxi Province, China	6805
An analysis on the water status in twigs and its relations to the drought resistance in Five woody plants living in arid zone	6815
The effect of fire on soil properties in a <i>Pinus massoniana</i> stand	6824
Water-environment effects of industry structure in Taihu Lake Basin in Jiangsu Province	6832
Effect of high temperature on enzymic activity, pigment content and chlorophyll fluorescence of two <i>Kappaphycus</i> species	6845
Analysis on characteristics of a typical drought event in Jiangsu Province	6853
Surface heat flux and energy budget for semi-arid grassland on the Loess Plateau	6866
Effects of light quality on photosynthetic characteristics and on the carotenoid and cuticular extract content in tobacco leaves	6877
Cyanobacterial diversity in biological soil crusts on wastelands of copper mine tailings	6886
Stereotypic behavior frequency and the influencing factors in captive Alpine musk deer (<i>Moschus sifanicus</i>)	6896
Zooplankton ecology near the Tianwan Nuclear Power Station	6902
Diel variations of fish assemblages in multiple habitats of Ma'an archipelago, Shengsi, China	6912
A novel cognitive-based approach to motivation for non-use value	6926
Review	
Salt-responsive proteomics in plants	6936
Research progress on forms of nitrogen and determination in the sediments	6947
Review of research progress of infectious diseases in wild birds	6959
Review on the methods to quantify fish's ability to cross velocity barriers in fish passage	6967
Monograph	
Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services: foundation, prospect and response strategy	6973
Scientific Note	
A comparative study of the spatial-temporal patterns of fine roots between young and mature <i>Caragana korshinskii</i> plantations	6978

2009 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊★

(源于 2010 年版 CSTPCD 数据库)

排序 Order	期刊 Journal	总被引频次 Total citation	排序 Order	期刊 Journal	影响因子 Impact factor
1	生态学报	11764	1	生态学报	1.812
2	应用生态学报	9430	2	植物生态学报	1.771
3	植物生态学报	4384	3	应用生态学报	1.733
4	西北植物学报	4177	4	生物多样性	1.553
5	生态学杂志	4048	5	生态学杂志	1.396
6	植物生理学通讯	3362	6	西北植物学报	0.986
7	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3327	7	兽类学报	0.894
8	MOLECULAR PLANT	1788	8	CELL RESEARCH	0.873
9	水生生物学报	1773	9	植物学报	0.841
10	遗传学报	1667	10	植物研究	0.809

★《生态学报》2009 年在核心版的 1964 种科技期刊排序中总被引频次 11764 次,全国排名第 1;影响因子 1.812,全国排名第 14;第 1—9 届连续 9 年入围中国百种杰出学术期刊;中国精品科技期刊

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报
(SHENGTAI XUEBAO)
(半月刊 1981 年 3 月创刊)
第 31 卷 第 22 期 (2011 年 11 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 31 No. 22 2011

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@csppg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@csppg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元