

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第 32 卷 第 10 期 Vol.32 No.10 **2012**

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 32 卷 第 10 期

2012 年 5 月 (半月刊)

目 次

基于系统动力学的城市住区形态变迁对城市代谢效率的影响.....	李旋旗,花利忠 (2965)
居住-就业距离对交通碳排放的影响	童抗抗,马克明 (2975)
经济学视角下的流域生态补偿制度——基于一个污染赔偿的算例	刘 涛,吴 钢,付 晓 (2985)
旅游开发对上海滨海湿地植被的影响.....	刘世栋,高 峻 (2992)
汶川地震对大熊猫主食竹——拐棍竹竹笋生长发育的影响.....	廖丽欢,徐 雨,冉江洪,等 (3001)
江西省森林碳蓄积过程及碳源/汇的时空格局.....	黄 麟,邵全琴,刘纪远 (3010)
伊洛河流域草本植物群落物种多样性.....	陈 杰,郭屹立,卢训令,等 (3021)
新疆绿洲农田不同连作年限棉花根际土壤微生物群落多样性.....	顾美英,徐万里,茆 军,等 (3031)
荒漠柠条锦鸡儿 AM 真菌多样性.....	贺学礼,陈 杰,郭辉娟,等 (3041)
彰武松、樟子松光合生产与蒸腾耗水特性	孟 鹏,李玉灵,尤国春,等 (3050)
中亚热带常绿阔叶林粗木质残体呼吸季节动态及影响因素.....	刘 强,杨智杰,贺旭东,等 (3061)
盐土和沙土对新疆常见一年生盐生植物生长和体内矿质组成的影响	张 科,田长彦,李春俭 (3069)
长白山北坡林线灌木草本植物与岳桦的动态关系.....	王晓东,刘惠清 (3077)
不同生态条件对烤烟形态及相关生理指标的影响.....	颜 侃,陈宗瑜 (3087)
基于因子分析的首蓿叶片叶绿素高光谱反演研究	肖艳芳,官辉力,周德民 (3098)
三峡库区消落带水淹初期土壤种子库月份动态.....	王晓荣,程瑞梅,唐万鹏,等 (3107)
三种利用方式对羊草草原土壤氨氧化细菌群落结构的影响.....	邹雨坤,张静妮,陈秀蓉,等 (3118)
西洋参根残体对自身生长的双重作用	焦晓林,杜 静,高微微 (3128)
不同程度南方菟丝子寄生对入侵植物三叶鬼针草生长的影响	张 静,闫 明,李钧敏 (3136)
山东省部分水岸带土壤重金属含量及污染评价.....	张 菊,陈诗越,邓焕广,等 (3144)
太湖蓝藻死亡腐烂产物对狐尾藻和水质的影响.....	刘丽贞,秦伯强,朱广伟,等 (3154)
不同生态恢复阶段无瓣海桑人工林湿地中大型底栖动物群落的演替.....	唐以杰,方展强,钟燕婷,等 (3160)
江西鄱阳湖流域中华秋沙鸭越冬期间的集群特征.....	邵明勤,曾宾宾,尚小龙,等 (3170)
秦岭森林鼠类对华山松种子捕食及其扩散的影响	常 罡,王开锋,王 智 (3177)
内蒙古草原小毛足鼠的活动性、代谢特征和体温的似昼夜节律	王鲁平,周 顺,孙国强 (3182)
温度和紫外辐射胁迫对西藏飞蝗抗氧化系统的影响.....	李 庆,吴 蕾,杨 刚,等 (3189)
“双季稻-鸭”共生生态系统 C 循环	张 帆,高旺盛,隋 鹏,等 (3198)
水稻籽粒灌浆过程中蛋白质表达特性及其对氮肥运筹的响应.....	张志兴,陈 军,李 忠,等 (3209)
专论与综述	
海水富营养化对海洋细菌影响的研究进展	张瑜斌,章洁香,孙省利 (3225)
海洋酸化效应对海水鱼类的综合影响评述.....	刘洪军,张振东,官曙光,等 (3233)
入侵种薇甘菊防治措施及策略评估.....	李鸣光,鲁尔贝,郭 强,等 (3240)
研究简报	
渭干河-库车河三角洲绿洲土地利用/覆被时空变化遥感研究	孙 倩,塔西甫拉提·特依拜,张 飞,等 (3252)
2009 年冬季东海浮游植物群集	郭术津,孙 军,戴民汉,等 (3266)
新疆野生多伞阿魏生境土壤理化性质和土壤微生物.....	付 勇,庄 丽,王仲科,等 (3279)
塔里木盆地塔里木沙拐枣群落特征	古丽努尔·沙比尔哈孜,潘伯荣,段士民 (3288)
矿区生态产业共生系统的稳定性.....	孙 博,王广成 (3296)
期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 338 * zh * P * ¥70.00 * 1510 * 36 * 2012-05	



封面图说: 哈巴雪山和金沙江——“三江并流”自然景观位于青藏高原南延部分的横断山脉纵谷地区,由怒江、澜沧江、金沙江及其流域内的山脉组成。它地处东亚、南亚和青藏高原三大地理区域的交汇处,是世界上罕见的高山地貌及其演化的代表地区,也是世界上生物物种最丰富的地区之一。哈巴雪山在金沙江左岸,与玉龙雪山隔江相望。图片反映的是金沙江的云南香格里拉段,远处为哈巴雪山。哈巴雪山主峰海拔 5396 m,而最低江面海拔仅为 1550 m,山脚与山顶的气温差达 22.8℃,巨大的海拔差异形成了明显的高山垂直性气候。

彩图提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201104060441

肖艳芳, 宫辉力, 周德民. 基于因子分析的苜蓿叶片叶绿素高光谱反演研究. 生态学报, 2012, 32(10): 3098-3106.

Xiao Y F, Gong H L, Zhou D M. A study on the hyperspectral inversion for estimating leaf chlorophyll content of clover based on factor analysis. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(10): 3098-3106.

基于因子分析的苜蓿叶片叶绿素高光谱反演研究

肖艳芳*, 宫辉力, 周德民

(首都师范大学 三维信息获取与应用教育部重点实验室, 北京 100048)

摘要: 因子分析是一种能够将具有错综复杂关系的变量归结为少数几个综合因子的多变量统计分析方法, 在降低数据维数的同时又可以保存足够的信息, 这为处理信息量丰富但冗余较大的高光谱数据提供了一种有效方法。利用 2010 年 9 月 23 日采集的 16 个样点的苜蓿叶片反射率及叶绿素含量数据, 采用因子分析方法, 分别提取苜蓿叶片反射率光谱 400—900nm, 以及可见光 400—760nm 和近红外 760—900nm 光谱区的公共因子, 分析因子载荷分布、载荷总量对公共因子与叶绿素含量相关性的影响。利用逐步回归法建立基于公共因子的叶片叶绿素反演模型, 并将反演模型与光谱指数建立的模型进行对比。研究表明, 1) 公共因子与叶片叶绿素的相关性, 在更大程度上是与该因子在各个波段上载荷分布有关, 而不是总载荷量; 2) 对波谱进行分区建立的反演模型略优于全区因子分析建立的反演模型; 3) 与常用于叶片叶绿素含量反演的光谱指数 CARI、MCARI、mND680、mND705、mSR705、TVI、DmSR、BGI、BRI 相比, 因子分析建立的叶绿素反演模型精度更高。

关键词: 因子分析; 叶绿素; 高光谱

A study on the hyperspectral inversion for estimating leaf chlorophyll content of clover based on factor analysis

XIAO Yanfang*, GONG Huili, ZHOU Demin

Key Laboratory of Three Dimension Information Acquisition and Application MOE, Capital Normal University, Beijing 100048, China

Abstract: Factor analysis is a statistical method used to describe variability among observed variables in terms of a potentially lower number of unobserved variables called factors. For the purpose of reducing the number of variables while retaining the most useful information, the factor analysis is an effective method to process hyperspectral data of rich useful information but much redundancy. The main objective of this study is to test if the factors of reflectance spectra of leaf can be used to inverse the chlorophyll concentration. The leaf reflectance spectra of 16 clover samples were collected using ASD (Analytical Spectral Devices) with the range of 325—1075nm and the spectral resolution of 3.5nm in September 23, 2010. The leaves were brought to laboratory to detect the chlorophyll concentration with 95% ethonal and ultraviolet spectrophotometer using the heat insulation barrel.

To reduce the disturbance of systematic error, only the reflectance spectral range from 400nm to 900nm was analyzed in this paper. The reflectance data was standardized before the reflectance spectra of leaves was divided into two segments, visible light segment from 400nm to 760nm, and near infrared segment from 760nm to 900nm. And after doing that, the reflectance spectral range of 400—900nm, 400—760nm and 760—900nm were analyzed using factor analysis separately in SPSS 13.0. We generated 15 factors from 400—900nm, 7 factors from 400—760nm and 14 factors from 760—900nm. And according to the factor scores calculated from SPSS software, we generated the factor values of three different spectra

基金项目: 国际科技合作项目(2010DFA92400); 北京市自然科学基金(8101002); 水利部公益性行业科研专项经费项目(8082010)

收稿日期: 2011-04-06; **修订日期:** 2011-09-19

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xiaoyanfang2006@126.com

ranges. The correlation coefficient between factors and chlorophyll concentration were calculated, and the spectral range of 400—760nm was taken as an example to analyze the impact of loading distribution and total loading capacity of factors on the correlation coefficient. Finally the inversion models for leaf chlorophyll concentration were established by using different factors with a stepwise regression method. These two models were compared with well established several spectral indexes. Only BRI, mND680, mND705, mSR705 have the determination coefficient R^2 above 0.5 among all the used spectral indexes. The R^2 of chlorophyll concentration inversion model established by overall factors, segment factors, BRI, mND680, mND705, mSR705 are 0.857, 0.869, 0.787, 0.728, 0.662, 0.597, and the relative errors are 15.3%, 14.3%, 23.7%, 21.5%, 24.9%, 29.7%. The result shows that: 1) To a great extent, the correlation coefficient between factors and leaf chlorophyll concentration was controlled by the loading distribution of factors rather than the loading capacity of factors. 2) Two chlorophyll concentration inversion models were established by factors, one using the first factor, the second factor and the eleventh factor of 400—900nm, and the other using the forth factor of 400—760nm and the first factor and the fourteenth factor of 760—900nm. The inversion model using factors from segmented reflectance spectral regions 400—760nm and 760—900nm, was slightly more accurate than the models estimated by factors from the full spectral range of 400—900nm. 3) Compared with spectral indexes including CARI, MCARI, mND680, mND705, mSR705, TVI, DmSR, BGI and BRI, the inversion models established by factors are more accurate due to a higher coefficient of determination R^2 and a lower relative error.

This study demonstrated that factor analysis can be an effective method to process hyperspectral data and inverse chlorophyll concentration. However, this paper need improve the wider suitability of the models further, since only the clover samples were used, and in the future the research need simulate leaf reflectance spectra using physical models, such as PROSPECT and LIBERTY.

Key Words: factor analysis; chlorophyll; hyperspectral data

植物体内的叶绿素是植物营养胁迫、光合能力和衰老进程各阶段的良好指示剂^[1],实时掌握其含量和分布的变化无论是对于农业经济,还是对于生态系统平衡都具有重大意义。遥感技术作为一种新型的探测技术能够弥补传统监测方法事后性、破坏性和难以大面积应用的缺点。尤其是高光谱数据的出现,其丰富的光谱信息在植被生化参数反演中表现出强大优势^[2],是目前植被生化参数反演最主要的数据源。高光谱数据一方面信息量丰富,另一方面数据也存在冗余性。如何最大限度的保留光谱信息,剔除冗余信息是植被生理生化参数反演中的重要问题^[3-5]。

因子分析模型是一种基于降维思想,将具有错综复杂关系的变量归结为少数几个不可观测的综合因子的多变量统计分析方法^[6]。因子分析假设可用变量间的相关性对变量进行分组,同组内的所有变量间高度相关,而组间的变量相关性较低。在这样的假设前提下,可以想象,各组变量内存在某个或某几个潜在的因子能够反映本组内所有变量的大部分信息。可以说,因子分析既可以有效降维,又可以保存原变量的信息^[7-18]。高光谱数据波段间的相关性较高,因此可以利用因子分析提取高光谱数据的公共因子。Lelong 等证明有限的主成分因子能够反映足够的光谱信息^[13];Gong 等分别利用主成分分析法和植被指数法反演美洲杉树叶片的全氮(TN)、全磷(TP)和全钾(TK)的含量,发现主成分分析法的反演结果优于植被指数法^[14];Ray 等利用主成分分析法反演不同灌溉条件下的小麦 LAI^[15]。基于上述研究基础,本文首先将叶片反射率光谱 400—900nm 分为可见光区域(400—760nm)和近红外区域(760—900nm),对分区前后的反射率光谱曲线分别进行因子分析,获取与叶片叶绿素浓度相关性高的因子,建立叶片叶绿素浓度反演模型,并与光谱指数建立的反演模型进行比较。

1 数据与方法

1.1 数据获取

2010 年 9 月 23 日于北京市延庆县野鸭湖湿地保护区,利用 ASD FieldSpec HandHeld 光谱仪野外实测 16

个样点的苜蓿叶片反射率光谱。波谱范围为 325—1075nm,光谱分辨率为 3.5nm,采样间隔约为 1.5nm,测量当天晴朗无云无风,测量时间为 10:00—14:00,由于苜蓿叶片较小,测量时同时将 5 片叶子放置在反射率近似为零的黑板上,叶片间相互重叠以防止产生缝隙,探头垂直向下,距叶片表面 0.1m。每次数据采集前进行标准白板校正,每次记录 10 个光谱曲线,其平均值作为该点叶片的反射率值。测量完光谱的叶片迅速放入保温桶中带回实验室测量叶绿素含量。叶绿素的测量采用 95% 的乙醇提取法,用分光光度计测定分光度,按以下公式计算叶绿素的总浓度。

$$C_a = 12.72 \times A_{663} - 2.59 \times A_{645}$$

$$C_b = 22.88 \times A_{645} - 4.67 \times A_{663}$$

$$C_t = C_a + C_b = 20.29 \times A_{645} + 8.05 \times A_{663}$$

$$C_{ab} = \frac{C_t \times V_t \times n}{FW \times 1000}$$

式中, C_t 为叶绿素浓度(mg/L), FW 为叶片鲜重(g), V_t 为提取液总体积(mL), n 为稀释倍数。

为了减少系统误差的干扰,只对 400—900nm 的反射率光谱进行处理和分析。图 1 是原始高光谱数据波段间相关系数矩阵图,从图中可以看出,波段之间的相关性较高,尤其是 760nm 以后的近红外波段,其波段间的相关性都在 0.9 以上,说明数据存在较大的冗余。图 2 显示了叶片反射率与叶绿素含量的相关关系。

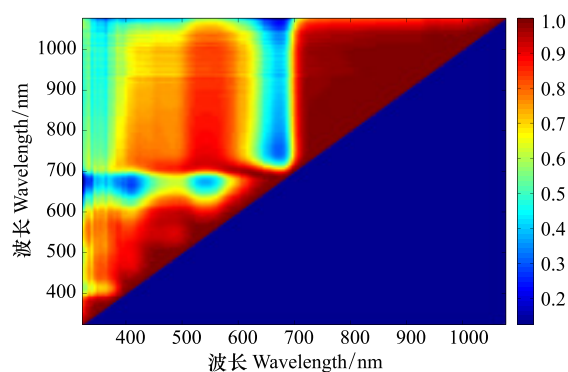


图 1 波段间相关系数矩阵图

Fig. 1 The matrix picture of coefficients between bands

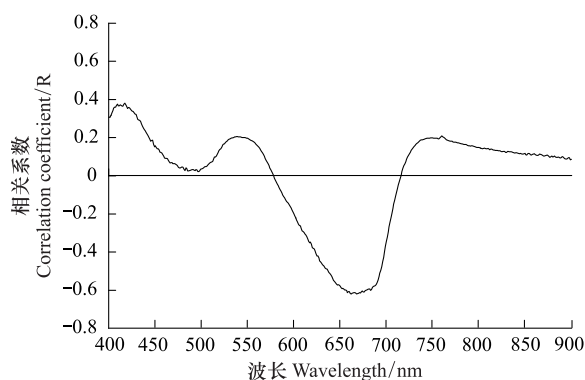


图 2 叶片反射率与叶绿素含量的相关关系

Fig. 2 The coefficient between leaf reflectance and chlorophyll content

1.2 因子分析方法

因子分析是研究从变量群中提取共性因子的统计方法,通过从多个变量中找出隐藏的具有代表性的因子,将同质的变量归为一个因子,以达到减少变量数目的目的。这与主成分分析的将主成分表示为原观测变量的线性组合有所不同。另外,因子分析可以通过旋转使得因子变量具有更强的可解释性。

设有 n 个样本,每个样本有 p 个观测变量,原始变量用 $X = (x_1, x_2, \dots, x_p)'$ 表示,公共因子用 $F = (F_1, F_2, \dots, F_m)$ ($m < p$) 表示。假设可以将原始变量 X 按相关性分组,使组内变量的相关性较高,组间变量的相关性较小,则可以用有限的 m 个公共因子反映原始变量的绝大部分信息。则因子分析的模型可表示为:

$$\begin{cases} X_1 = a_{11}F_1 + a_{12}F_2 + \dots + a_{1m}F_m + \varepsilon_1 \\ X_2 = a_{21}F_1 + a_{22}F_2 + \dots + a_{2m}F_m + \varepsilon_2 \\ \dots\dots\dots \\ X_p = a_{p1}F_1 + a_{p2}F_2 + \dots + a_{pm}F_m + \varepsilon_p \end{cases}$$

其矩阵形式可表示为:

$$X = AF + \varepsilon$$

其中,

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{p1} & a_{p2} & \cdots & a_{pm} \end{bmatrix}, \quad F = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_m \end{bmatrix}$$

矩阵 F 为公共因子,他们相互独立且不可观测,是对每个原始观测变量都起作用的因子,矩阵 ε 为特殊因子,它们分别只对某一原始观测变量起作用。矩阵 A 为因子载荷矩阵, a_{ij} 为因子载荷, a_{ij} 的绝对值越大,表明 F_j 对 X_i 的依赖程度越大。

因子分析模型中的 3 个重要参量为:

1) 因子载荷 a_{ij}

$$a_{ij} = \text{Cov}(X_i, F_j) = \text{Cov}\left(\sum_{i=1}^m a_{ij}F_j + \varepsilon_i, F_j\right)$$

式中, a_{ij} 是 X_i 和 F_j 的协方差,其统计意义表示第 i 个变量在的 j 个因子上的负荷。变量经过标准化处理后, a_{ij} 同时也是 X_i 和 F_j 的相关系数。

2) 变量共同度

变量 X_i 的共同度定义为因子载荷阵 A 中第 i 行元素的平方和,即

$$h_i^2 = \sum_{j=1}^m a_{ij}^2 \quad i = 1, 2, \cdots, p$$

h_i^2 越接近 1,说明该变量的几乎全部原始信息都可由所选取的公共因子说明。

3) 公共因子 F_j 的方差贡献

公共因子的方差贡献是指某一公共因子 F_j 与所有原始变量 X_i 的关系。

$$g_j^2 = \sum_{i=1}^p a_{ij}^2 \quad j = 1, 2, \cdots, m$$

方差贡献是衡量公共因子重要性的指标, g_j^2 越大,表明公共因子 F_j 对 X 的贡献越大。

在因子分析中很重要的一步是对因子载荷矩阵实行旋转,这是因为因子分析直接得到的公共因子往往含义不明确,不便于对背景进行解释,此时根据因子载荷矩阵的不唯一性,可以将因子载荷矩阵旋转,以便找到实际意义更明显的公共因子。

2 数据处理

1) 数据标准化

对实测反射率光谱数据进行标准化处理,采用的方法为偏重法,公式如下:

$$x_{ij}^* = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{\sqrt{\text{var}(x_j)}} \quad i = 1, 2, \cdots, n; \quad j = 1, 2, \cdots, p$$

式中, \bar{x}_j 和 $\sqrt{\text{var}(x_j)}$ 分别是第 j 个变量的均值和标准差,在这里表示为第 j 波段的均值和标准差。数据标准化后每个变量的均值为 0,标准差为 1。

2) 因子分析

利用 SPSS 软件对标准化后的光谱数据进行因子分析。根据植被光谱的特点,本文对 400—900nm 全光谱,以及可见光区域(400—760nm)和近红外区域(760—900nm)两个分区,分别进行因子分析。得到的方差解释及旋转后的因子贡献度如图 3、图 4、图 5 所示。全局光谱因子分析得到的 15 个公共因子能够反映

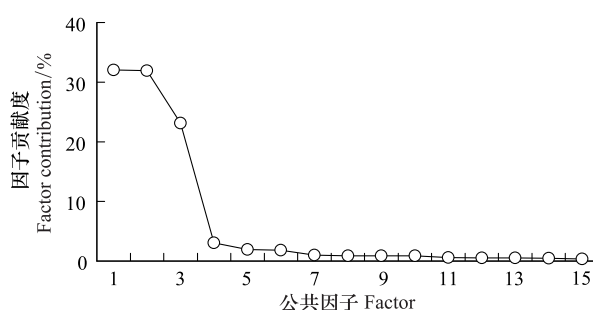


图 3 400—900nm 波段旋转后因子贡献度

Fig. 3 Rotation sums of squared loadings of 400—900nm

原始光谱的全部信息;可见光区因子分析得到的 7 个公共因子和近红外区因子分析得到的 14 个公共因子都反映了原始光谱 99% 的信息。

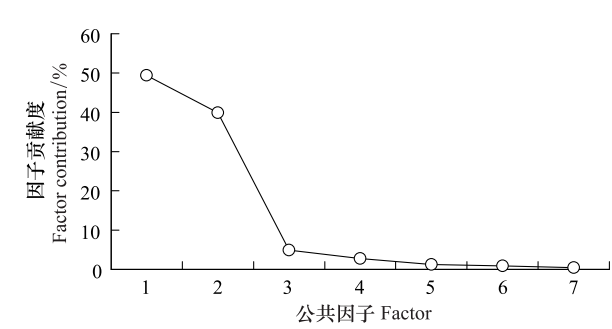


图 4 400—760nm 波段旋转后因子贡献度
Fig. 4 Rotation sums of squared loadings of 400—760nm

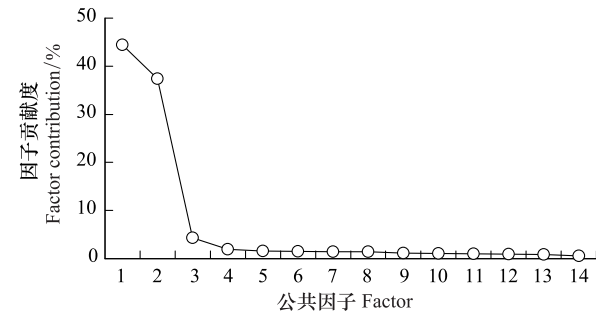


图 5 760—900nm 波段旋转后因子贡献度
Fig. 5 Rotation sums of squared loadings of 760—900nm

表 1 公共因子与叶片叶绿素含量的相关关系

Table 1 Correlation coefficients between factors and chlorophyll content of leaves					
全波段 Full spectral (400—900nm)		可见光波段 VIS(400—760nm)		近红外波段 NIR(760—900nm)	
公共因子 Factor	相关系数	公共因子 Factor	相关系数	公共因子 Factor	相关系数
1	0.658	1	0.649	1	0.653
2	0.659	2	0.690	2	-0.435
3	-0.031	3	-0.325	3	0.345
4	-0.385	4	-0.811	4	-0.152
5	0.180	5	0.541	5	-0.116
6	0.014	6	-0.236	6	0.024
7	0.110	7	0.266	7	0.369
8	0.119			8	0.203
9	0.037			9	-0.085
10	0.191			10	-0.045
11	-0.552			11	-0.250
12	-0.176			12	0.103
13	0.065			13	-0.002
14	-0.138			14	0.536
15	0.258				

3 结果与分析

3.1 公共因子与叶绿素的相关性

根据 SPSS 软件计算得到的因子得分,分别得到全局波段及两个分区波段的公共因子值,与实测的叶片叶绿素含量进行相关性分析,结果如表 1 所示。

以可见光分区为例,说明不同公共因子与叶绿素含量相关性的差异。图 6 显示了可见光分区内与叶片叶绿素含量相关性较高的第一因子、第二因子和第四因子的载荷分布情况。已有研究证明,叶绿素等色素浓度含量降低,叶绿素在蓝、红波段的吸收减少,反射率增强,而近红外区域的反射率呈下降趋势。可见光区的“蓝边”(490—530nm)、“绿峰”(510—560nm)、“黄边”(560—640nm)、“红谷”(650—690nm)、“红边”(680—760nm)是描述植物色素状态和健康状况的重要指示波段。以可见光区域为例,第一因子在 400—510nm、575—660nm 和 685—715nm 波段载荷较大;第二因子在 505—580nm、615—695nm、725—755nm 波段的载荷较大;第四因子在 485—520nm、605nm、680—685nm 波段的载荷较大,因此第一因子、第二因子和第四因子与叶绿素含量的相关性较高。而第四因子的相关性高于第一、第二因子的原因可能是第一因子和第二因子的总载

荷量虽然最高,但是由于所涵盖的波段范围内不仅包括了叶绿素含量的指示波段,还包括部分对叶绿素反应不敏感的波段,这些波段的存在可能在一定程度上减弱了第一、二因子与叶绿素含量的相关性。第四因子中载荷较大的波段都包含在叶绿素含量的指示波段内,且这些波段与叶绿素含量呈负相关。因此,公共因子与叶片叶绿素的相关性,可能在更大程度上是与该因子在各个波段上载荷分布有关,而不是总载荷量。另外,实验误差也可能会对相关性的差异造成一定的影响。

3.2 基于因子分析的叶片叶绿素反演模型与高光谱指数的比较分析

选用全局因子分析得到的 15 个因子,以及可见光区和近红外区因子分析得到的共 24 个因子,分别在 SPSS 软件中采用逐步引入法进行多元线性回归。国内外建立的与色素含量具有响应关系的光谱指数很多,选取常用于叶片叶绿素含量反演的光谱指数 CARI (Chlorophyll absorption ratio index)、MCARI (modified Chlorophyll absorption ratio index)、mND680 (modified normalized difference)、mND705 (modified normalized difference)、mSR705 (modified SR)、TVI (triangular VI)、DmSR (modified SR of derivatives)、BGI (blue green pigment index)、BRI (blue red pigment index) 与实测叶片叶绿素含量进行回归分析(表 2)。

表 2 本文采用的光谱指数列表

Table 2 Summary of different spectral VIs used in this study

光谱指数 spectral indexes	计算公式 design formulas	相关文献 related literatures
CARI	$((a670 + R_{670} + b) / (a^2 + 1)^{1/2}) \times (R_{700} / R_{670})$ $a = (R_{700} - R_{550}) / 150, b = R_{550} - (a \times 550)$	[19]
MCARI	$[(R_{701} - R_{671}) - 0.2(R_{701} - R_{549})] / (R_{701} / R_{671})$	[20]
mND680	$(R_{800} - R_{680}) / (R_{800} + R_{680} - 2R_{445})$	[21]
mND705	$(R_{750} - R_{705}) / (R_{750} + R_{705} - 2R_{445})$	[21]
mSR705	$(R_{750} - R_{445}) / (R_{705} - R_{445})$	[21]
TVI	$0.5[120(R_{750} - R_{550}) - 200(R_{670} - R_{550})]$	[22-23]
DmSR	$(DR_{720} - DR_{500}) / (DR_{720} + DR_{500})$ DR_{λ} 为波长 λ 处的反射率一阶导数	[24]
BGI	R_{450} / R_{550}	[25]
BRI	R_{450} / R_{690}	[25]

表 3 中列出了分区和未分区的公共因子、以及表现较好的光谱指数与叶片叶绿素的拟合方程、确定系数及相对误差。其中, F_1, F_2, F_{11} 为 400—900nm 光谱区的第 1 因子、第 2 因子和第 11 因子, V_4 为 400—760nm 光谱区的第四因子, N_7, N_{14} 为 760—900nm 光谱区的第七因子和第十四因子。从模型的确定系数和相对误差看,利用分区波段因子建立的模型与利用全局波段因子建立的模型相比没有明显的差异。图 7 展示表现较好的回归方程拟合效果图,与叶绿素含量具有较高相关性的光谱指数有 BRI、mND680、mND705、mSR705。从图中可以看出,利用因子分析反演叶片叶绿素在确定系数和相对误差上都要优于光谱指数 BRI、mND680、mND705、mSR705 的反演结果。

4 结论

本文分别对实测苜蓿叶片反射率光谱 400—900nm、可见光区域 400—760nm 和近红外区域 760—900nm

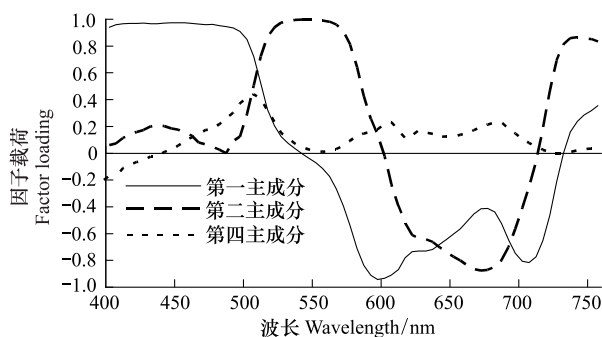


图 6 可见光区域第一因子、第二因子和第四因子载荷分布图

Fig. 6 Load map of the first factor, the second factor and the fourth factor in visible light region

进行因子分析,建立基于公共因子的叶片叶绿素反演模型。研究表明:

表 3 因子和光谱指数的叶片叶绿素反演模型

Table 3 Inversion models for leaf chlorophyll content estimated by factors and spectral VIs				
模型编号 Model number	模型参数 Model parameters	模型方程 Models	确定系数 R^2 Coefficient of determination	相对误差/% Relative error
①	F_1, F_2, F_{11}	$y=5.566 \times F_1+9.257 \times F_2-2.695 \times F_{11}+2.180$	0.857	15.3
②	V_4, N_7, N_{14}	$y=4.681 \times N_7+4.559 \times N_{14}-5.715 \times V_4-21.807$	0.869	14.3
③	BRI	$y=5.796 \times \text{BRI}-1.511$	0.787	23.7
④	mND680	$y=7.376 \times \text{mND680}-4.833$	0.728	21.5
⑤	mND705	$y=7.933 \times \text{mND705}-1.773$	0.662	24.9
⑥	mSR705	$y=1.152 \times \text{mSR705}-1.313$	0.597	29.7

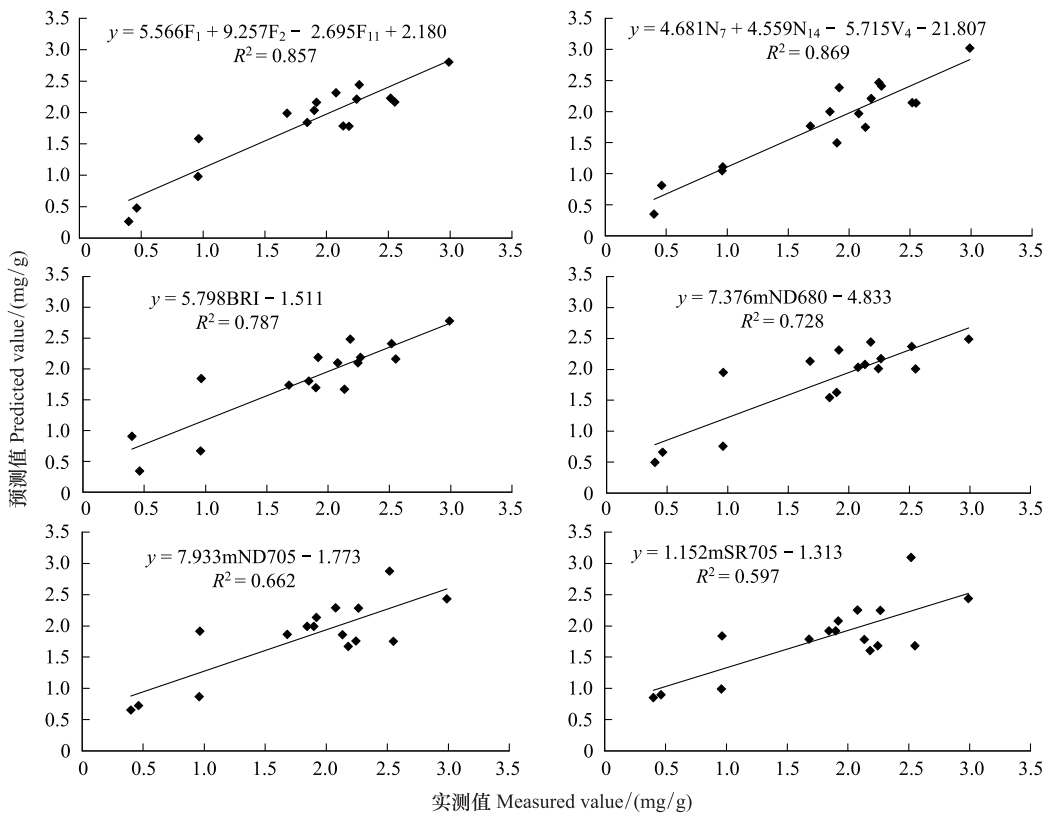


图 7 叶片叶绿素含量预测值与实测值之间的比较 (n=16)

Fig 7 Comparison of estimated with measured leaf chlorophyll (n=16)

- 1)从本文所采集的数据看,公共因子与叶片叶绿素含量的相关程度主要受公共因子载荷分布情况的影响,公共因子在叶绿素敏感波段的相对载荷越大,其与叶绿素的相关性越高。例如,可见光区域的第四因子中载荷较大的波段都包含在叶绿素含量的指示波段内,且这些波段与叶绿素含量呈负相关,这些因素可能导致了第四因子与叶片叶绿素含量具有较高的相关性。
- 2)从建立的叶片叶绿素反演模型上看,分区因子分析建立的反演模型略优于全区因子分析建立的反演模型,但差别不大。
- 3)与常用于叶片叶绿素含量反演的光谱指数 CARI、MCARI、mND680、mND705、mSR705、TVI、DmSR、BGI、BRI 相比,因子分析建立的叶绿素反演模型精度更高。
- 本研究以苜蓿叶片为例,对模型是否适用于混合植被叶片的叶绿素含量反演需要进一步研究。同时光谱

测量难免受到环境因素的影响,因此作者将考虑应用叶片反射率模型模拟的结果进行分析。

References:

- [1] Merzlyak M N, Gitelson A A, Chivkunova O B, Rakitin V Y. Nondestructive optical detection of pigment changes during leaf senescence and fruit ripening. *Physiologia Plantarum*, 1999, 106: 135-141.
- [2] Vane G, Goetz A F G. Terrestrial imaging spectrometry: current status, future trends, *Remote Sensing of Environment*, 1993, 44 (2): 109-127.
- [3] Liu Q B, Xiang L B, Xue B, Zhou J S. Endmember determination in hyperspectral data. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 34 (9): 1336-1339.
- [4] Du P J, Chen Y H, Fang T, Chen Y Y. Study on the extraction and applications of spectral features in Hyperspectral remote sensing. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2003, 32(5): 500-504.
- [5] Xue X Q, Tian Q J, Du F L. Analysis of hyperspectral remote sensing images using a simplex method. *Journal of Image and Graphics*, 2004, 9 (12): 1486-1490.
- [6] Li J P, Xie B C. The method and application of multi-stat-analysis. China Renmin University Press, 2008.
- [7] Chen Y, Zhang T N, Guo P, Wang X H, Wang Q, Chang S J. Quantitative analysis for nonlinear Fluorescent spectra based on principal component analysis. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(5): 1285-1291.
- [8] Chen Y H, Jiang J B, Huang W J, Wang Y Y. Comparison of principal component analysis with VI-Empirical approach for estimating severity of yellow rust of winter wheat. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, 29(8): 2161-2164.
- [9] Li Z Y, Kuang G Y, Yu W X, Xue Q. Algorithm on small target detection base on principal component of hyperspectral imagery. *Journal Infrared Millimeter and Waves*, 2004, 23(4): 286-290.
- [10] Zhang J, Li G C, Liu X H, Han X G. Relations of grassland bio-parameters based on PCA combining community survey and vegetation spectrum. *Journal of Remote Sensing*, 2005, 9(6): 725-732.
- [11] Shi K, Li Y M, Wang Q, Yang Y, Jin X, Wang Y F, Yin B, Zhang H. Application of factor analysis method in water quality parameters inversing. *Journal of Lake Sciences*, 2010, 22(3): 391-399.
- [12] Zhao M, Zhou G S. Carbon storage of forest vegetation and its relationship with climatic factors. *Scientia Geographica Sinica*, 2004, 24(1): 50-54.
- [13] Lelong C C D, Pinet P C, Poilve H. Hyperspectral imaging and stress mapping in agriculture: a case study on wheat in because (France). *Remote Sensing of Environment*, 1998, 66: 179-191.
- [14] Gong P, Pu R L, Heald R C. Analysis of in situ hyperspectral data for nutrient estimation of giant sequoia. *International Journal of Remote Sensing*, 2002, 23(9): 1827-1850.
- [15] Ray S S, Das G, Singh J P, Panigrahy S. Evaluation of hyperspectral indices for LAI estimation and discrimination of potato crop under different irrigation treatments. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, 27(24): 5373-5387.
- [16] Feng Y, He M Y, Song J J, Wei J. ICA-based dimensionality reduction and compression of hyperspectral images. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2007, 29(12): 2871-2875.
- [17] Cao W X, Zhong Q Y, Yang Y Z. Principal component analysis for ocean color remote sensing in South China Sea. *Journal of Remote Sensing*, 1999, 3(2): 112-115.
- [18] Yang Y, Tian Q J. Principal component analysis method for retrieving leaf area index of rice from hyperspectral data. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2007, 3: 47-50.
- [19] Kim M S, Daughtry C S T, Chappelle E W, McMurtry J E, Walthall C L. The use of high spectral resolution bands for estimating absorbed photosynthetically active radiation (APAR). In *Proceedings of the 6th International Symposium on Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing*, 1994, 299-306. France: Val d'Isere.
- [20] Daughtry C S T, Walthall C L, Kim M S, DeColstoun E B, McMurtry J E. Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 2000, 74(2): 229-239.
- [21] Sims D A, Gamon J A. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 81(2/3): 337-354.
- [22] Broge N H, Leblanc E. Comparing prediction power and stability of broadband and hyperspectral vegetation indices for estimation of green leaf area index and canopy chlorophyll density. *Remote Sensing of Environment*, 2000, 76(2): 156-172.
- [23] Haboudane D, Miller J R, Pattery E, Zarco-Tejada P J, Strachan I B. Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 90(3): 337-352.
- [24] le Maire G, Francois C, Dufrene E. Towards universal broad leaf chlorophyll indices using PROSPECT simulated database and hyperspectral

reflectance measurements. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 89(1):1-28.

- [25] Zarco-Tejada P J, Berjón A, López-Lozano R, Miller J R, Martín P, Cachorro V, Gonzalez M, Defrutos A. Assessing vineyard condition with hyperspectral indices: Leaf and canopy reflectance simulation in a row-structured discontinuous canopy. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 99(3): 271-287.

参考文献:

- [3] 吕群波, 相里斌, 薛彬, 周锦松. 高光谱图像中纯光谱提取方法. *光子学报*, 2009, 34(9): 1336-1339.
- [4] 杜培军, 陈云浩, 方涛, 陈雍业. 高光谱遥感数据光谱特征的提取与应用. *中国矿业大学学报*, 2003, 32(5): 500-504.
- [5] 夏学齐, 田庆久, 杜凤兰. 高光谱遥感图像的单形体分析方法. *中国图象图形学报*, 2004, 9(12): 1486-1490.
- [6] 李静萍, 谢邦昌. 多元统计分析方法与应用. 中国人民大学出版社, 2008.
- [7] 陈扬, 张太宁, 郭澎, 王湘晖, 王倩, 常胜江. 基于主成分分析的复杂光谱定量分析方法的研究. *光学学报*, 2009, 29(5): 1285-1291.
- [8] 陈云浩, 蒋金豹, 黄文江, 王圆圆. 主成分分析法与植被指数经验方法估测冬小麦条锈病严重度的对比研究. *光谱学与光谱分析*, 2009, 29(8): 2161-2164.
- [9] 李智勇, 匡纲要, 郁文贤, 薛绮. 基于高光谱图像主成分分量的小目标检测算法研究. *红外与毫米波学报*, 2004, 23(4): 286-290.
- [10] 张剑, 李贵才, 刘先华, 韩兴国. 用群落调查及光谱观测数据的主成分分析方法研究草场各生物参数之间的关系. *遥感学报*, 2005, 9(6): 725-732.
- [11] 施坤, 李云梅, 王桥, 杨煜, 金鑫, 王彦飞, 尹斌, 张红. 因子分析法在水质参数反演中的应用. *湖泊科学*, 2010, 22(3): 391-399.
- [12] 赵敏, 周广胜. 中国森林生态系统的植物碳贮量及其影响因子分析. *地理科学*, 2004, 24(1): 50-54.
- [16] 冯燕, 何明一, 宋江红, 魏江. 基于独立成分分析的高光谱图像数据降维及压缩. *电子与信息学报*, 2007, 29(12): 2871-2875.
- [17] 曹文熙, 钟其英, 杨跃忠. 南海水色遥感的主因子分析. *遥感学报*, 1999, 3(2): 112-115.
- [18] 杨燕, 田庆久. 高光谱反演水稻叶面积指数的主成分分析法. *国土资源遥感*, 2007, 3: 47-50.

CONTENTS

Landscape aesthetic assessment based on experiential paradigm assessment technology	LI Xuanqi, HUA Lizhong (2965)
Significant impact of job-housing distance on carbon emissions from transport: a scenario analysis	TONG Kangkang, MA Keming (2975)
The watershed eco-compensation system from the perspective of economics: the cases of pollution compensation	LIU Tao, WU Gang, FU Xiao (2985)
The tourism development impact on Shanghai coastal wetland vegetation	LIU Shidong, GAO Jun (2992)
Effects of the Wenchuan Earthquake on shoot growth and development of the umbrella bamboo (<i>Fargesia robusta</i>), one of the giant panda's staple bamboos	LIAO Lihuan, XU Yu, RAN Jianghong, et al (3001)
Forest carbon sequestration and carbon sink/source in Jiangxi Province	HUANG Lin, SHAO Quanqin, LIU Jiyuan (3010)
Species diversity of herbaceous communities in the Yiluo River Basin	CHEN Jie, GUO Yili, LU Xunling, et al (3021)
Microbial community diversity of rhizosphere soil in continuous cotton cropping system in Xinjiang	GU Meiyang, XU Wanli, MAO Jun, et al (3031)
Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in the rhizosphere of <i>Caragana korshinskii</i> Kom. in desert zone	HE Xueli, CHEN Zheng, GUO Huijuan, et al (3041)
Characteristics of photosynthetic productivity and water-consumption for transpiration in <i>Pinus densiflora</i> var. <i>zhangwuensis</i> and <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i>	MENG Peng, LI Yuling, YOU Guochun, et al (3050)
Seasonal dynamic and influencing factors of coarse woody debris respiration in mid-subtropical evergreen broad-leaved forest	LIU Qiang, YANG Zhijie, HE Xudong, et al (3061)
Influence of saline soil and sandy soil on growth and mineral constituents of common annual halophytes in Xinjiang	ZHANG Ke, TIAN Changyan, LI Chunjian (3069)
Dynamics change of <i>Betula ermanii</i> population related to shrub and grass on treeline of northern slope of Changbai Mountains	WANG Xiaodong, LIU Huiqing (3077)
Effects of ecological conditions on morphological and physiological characters of tobacco	YAN Kan, CHEN Zongyu (3087)
A study on the hyperspectral inversion for estimating leaf chlorophyll content of clover based on factor analysis	XIAO Yanfang, GONG Huili, ZHOU Demin (3098)
Monthly dynamic variation of soil seed bank in water-level-fluctuating zone of Three Gorges Reservoir at the beginning after charging water	WANG Xiaorong, CHENG Ruimei, TANG Wanpeng, et al (3107)
Effects of three land use patterns on diversity and community structure of soil ammonia-oxidizing bacteria in <i>Leymus chinensis</i> steppe	ZOU Yukun, ZHANG Jingni, CHEN Xiurong, et al (3118)
Autotoxicity and promoting: dual effects of root litter on American ginseng growth	JIAO Xiaolin, DU Jing, GAO Weiwei (3128)
Effect of differing levels parasitism from native <i>Cuscuta australis</i> on invasive <i>Bidens pilosa</i> growth	ZHANG Jing, YAN Ming, LI Junmin (3136)
Heavy metal concentrations and pollution assessment of riparian soils in Shandong Province	ZHANG Ju, CHEN Shiyue, DENG Huanguang, et al (3144)
Effect of decomposition products of cyanobacteria on <i>Myriophyllum spicatum</i> and water quality in Lake Taihu, China	LIU Lizhen, QIN Boqiang, ZHU Guangwei, et al (3154)
Succession of macrofauna communities in wetlands of <i>Sonneratia apetala</i> artificial mangroves during different ecological restoration stages	TANG Yijie, FANG Zhanqiang, ZHONG Yanting, et al (3160)
Group characteristics of Chinese Merganser (<i>Mergus squamatus</i>) during the wintering period in Poyang Lake watershed, Jiangxi Province	SHAO Mingqin, ZENG Binbin, SHANG Xiaolong, et al (3170)
Effect of forest rodents on predation and dispersal of <i>Pinus armandii</i> seeds in Qinling Mountains	CHANG Gang, WANG Kaifeng, WANG Zhi (3177)
Circadian rhythms of activity, metabolic rate and body temperature in desert hamsters (<i>Phodopus roborovskii</i>)	WANG Luping, ZHOU Shun, SUN Guoqiang (3182)
Effects of temperature stress and ultraviolet radiation stress on antioxidant systems of <i>Locusta migratoria tibetensis</i> Chen	LI Qing, WU Lei, YANG Gang, et al (3189)
Carbon cycling from rice-duck mutual ecosystem during double cropping rice growth season	ZHANG Fan, GAO Wangsheng, SUI Peng, et al (3198)
Protein expression characteristics and their response to nitrogen application during grain-filling stage of rice (<i>Oryza Sativa</i> L.)	ZHANG Zhixing, CHENG Jun, LI Zhong, et al (3209)
Review and Monograph	
Advances in influence of seawater eutrophication on marine bacteria	ZHANG Yubin, ZHANG Jiexiang, SUN Xingli (3225)
A review of comprehensive effect of ocean acidification on marine fishes	LIU Hongjun, ZHANG Zhendong, GUAN Shuguang, et al (3233)
Evaluation of the controlling methods and strategies for <i>Mikania micrantha</i> H. B. K.	LI Mingguang, LU Erbei, GUO Qiang, et al (3240)
Scientific Note	
Dynamics of land use/cover changes in the Weigan and Kuqa rivers delta oasis based on Remote Sensing	SUN Qian, TASHPOLAT. Tiyp, ZHANG Fei, et al (3252)
Phytoplankton assemblages in East China Sea in winter 2009	GUO Shujin, SUN Jun, DAI Minhan, et al (3266)
On the physical chemical and soil microbial properties of soils in the habitat of wild Ferula in Xinjiang	FU Yong, ZHUANG Li, WANG Zhongke, et al (3279)
The community characteristics of <i>Calligonum roborowskii</i> A. Los in Tarim Basin	Gulnur Sabirhazi, PAN Borong, DAUN Shimin (3288)
Stability analysis of mine ecological industrial symbiotic system	SUN Bo, WANG Guangcheng (3296)

《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的自然科学高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 70 元/册,全年定价 1680 元。

国内邮发代号:82-7 国外邮发代号:M670 标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

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 32 卷 第 10 期 (2012 年 5 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 10 (May, 2012)

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:100071	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@cspg.net	Distributed by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel: (010)64034563 E-mail: journal@cspg.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