

DOI: 10.5846/stxb201411062199

袁晓波,牛得草,吴淑娟,蒲向东,王龙,滕家明,傅华.黄土高原典型草原地上生物量估测模型.生态学报,2016,36(13): - .

Yuan X B, Niu D C, Wu S J, Pu X D, Wang L, Teng J M, Fu H. Estimation of aboveground biomass in the grassland of the Loess Plateau, Northern China. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(13): - .

黄土高原典型草原地上生物量估测模型

袁晓波,牛得草*,吴淑娟,蒲向东,王龙,滕家明,傅 华

草地农业生态系统国家重点实验室,兰州大学草地农业科技学院,兰州 730020

摘要:为了寻求有效的草地地上生物量估测方法和精确估测黄土高原典型草原草原地上生物量。于 2014 年 8 月中旬,在黄土高原典型草原草原地上生物量达到最大值,分别从单株水平和种群水平进行野外调查。以株高(H)和盖度(C)的复合因子(C * H)为自变量,通过回归分析,建立地上生物量估测模型,采用留一法对其精确性进行评估;并通过校正系数以及群落总生物量估测值和实测值比较单株水平和种群水平所建模型的精确性。结果表明:黄土高原典型草原草地,无论在单株水平还是种群水平,线性函数对该区域生物量的拟合效果更好。估测模型检验结果表明,在单株水平各个物种的生物量估测值与实测值相关性较好,均达到了显著水平($P < 0.05$),其 r 值均大于 0.6,总相对误差 RS 均小于 10%,平均相对误差绝对值 RMA (average absolute value of relative error) 均小于 30%,总生物量的实测值与估测值比较接近,校正系数均接近 1;而在种群水平上,虽然各物种的生物量估测值与实测值相关性均达到了显著水平($P < 0.05$),但多数物种平均相对误差绝对值 RMA 大于 30%,总相对误差 RS (total relative error) 均大于 10%,总生物量的估测值均大于实测值,校正系数均偏离了 1,说明在黄土高原典型草原通过单株水平建立的物种生物量估测模型的精度优于种群水平建立的物种生物量估测模型的精度。

关键词:单株水平;种群水平;地上生物量;估测模型;黄土高原

Estimation of aboveground biomass in the grassland of the Loess Plateau, Northern China

YUAN Xiaobo, NIU Decao*, WU Shujuan, PU Xiangdong, WANG Long, TENG Jiaming, FU Hua

State Key Laboratory of Grassland Agro-ecosystem, College of Pastoral Agriculture Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730020, China

Abstract: In order to find an effective and precise method for estimating aboveground biomass and grassland biomass of the Loess Plateau, field surveys at the individual and population levels were conducted, and an estimation model was established. The model included the composite factor CH (product of vegetation coverage and height) as the independent variables, and regression analysis was used to estimate the grassland biomass of the Loess Plateau in mid-August of 2014. Simultaneously, the accuracy of the estimation models of aboveground biomass were assessed using the leave-one-out analysis method combined with the correlation coefficient (r), average absolute value of relative error (RMA), total relative error (RS), and correction factor. The results showed that all estimation models of aboveground biomass were linear and exponential functions at both the individual and population levels in the grassland of the Loess Plateau. The results of accuracy testing of the estimation model showed that the relationship between the estimated and measured biomass values were well correlated at the individual level, and reached a significant level ($P < 0.05$) with almost all r values greater than 0.6, RS values less than 10%, RMA less than 30%, and the correction coefficient close to 1. However, at the population

基金项目:国家重点基础研究发展计划项目(2014CB138703);国家自然科学基金(31201837, 31572458);兰州大学中央高校基本科研业务费专项资金资助(lzujbky-2014-78);高等学校博士学科点专项科研基金(20120211110029);长江学者和创新团队发展计划资助(IRT13019);兰州大学“本科教学工程”国家级大学生创新创业训练计划(201510730100)

收稿日期:2014-11-06; 网络出版日期:2015-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xiaocao0373@163.com

level, although the correlation between the estimated and measured biomass values was significant ($P < 0.05$), the RMA of most species was greater than 30%, the RS values were greater than 10%, and the measured values were less than the estimated values with correction coefficients deviating from 1. Together, these results showed that the accuracy of estimation models of aboveground biomass established at the individual level is better than for those established at the population level in the Loess Plateau grassland.

Key Words: individual level; population level; aboveground biomass; estimation model; Loess Plateau

草地是我国陆地生态系统的重要组成部分。草地生物量不仅在全球碳循环和气候变化与草地生态系统之间的反馈作用中扮演着重要角色^[1-4],而且决定着草地生态系统功能稳定性并作为系统能量流动和物质循环的基础,显著影响生态系统的结构^[5]。此外,草地生物量的研究也为评估野生动物分布、合理规划草地资源、确定草地载畜量、草原火灾管理、生物多样性研究以及评估草地生态效益提供了重要参考依据^[6-9]。因此快速、准确估测草地地上生物量及群落中物种生物量对草地生态系统管理和认识草地各物种的生态位的变化具有重要意义^[10]。

目前,草地地上生物量测定的主要方法有直接收获法,该法结果准确,但繁琐、费时,而且对样地破坏性很大,尤其是对群落结构变化的长期监测试验难以实行^[11-13]。另一种方法是基于与生物量密切相关的植被因子参数,通过数理方法建立草地地上生物量估测模型,该法可准确、迅速、无破坏性地估测草地的生物量^[14]。国内外关于植物地上生物量估测模型的研究多见于乔木和灌木的报道,而对草本植物生物量模型估测的研究多基于植被盖度、生物量作为参数^[15-17]和群落物种高度和盖度建立了估测模型^[18];也有根据大量地上观测数据结合遥感数据建立了草地地上生物量指数和幂函数统计估测模型^[19-20]。

以上研究多集中于植被生长比较均一的草地,但对于植被稀疏、生长不均一、生态环境比较脆弱的黄土高原典型草原地上生物量估测模型的研究尚未见报道。此外,单株生物量估测模型通常用于乔木和灌木,对于从个体水平建立草地生物量估测模型的研究尚未见报道。因此,本文分别通过对黄土高原典型草原种群水平和单株水平生物量的实地样方调查,选择株高(H)和盖度(C)的复合因子($C * H$)为自变量,应用数理统计方法分别建立单株水平和种群水平不同物种地上生物量估测模型,并对其进行检验、比较其精确性,为该区域地上生物量的测定提供了一个快速、准确且不具有破坏性的估测方法。

1 材料与方法

1.1 研究区自然概况

研究区设在甘肃省榆中县兰州大学黄土高原国际地面与环境监测站围封草地($35^{\circ}57' N, 104^{\circ}09' E$),海拔 1965.8 m。该地区为黄土高原残塬梁峁沟壑,属于大陆性半干旱性气候,年均气温 $6.7^{\circ}C$,年降水量约 382 mm,年蒸发量 1 343 mm,无霜期为 90—140 a,年日照时数约 2 600 h。该区域塬面原为传统的耕作农田,1986 年撂荒,已基本恢复到天然植被。2005 年 10 月设置围栏对草地进行围封。该区植被类型属于半干旱典型草原,植被组成主要为长芒草(*Stipa bungeana*)、阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus*)、赖草(*Leymus secalinus*)和米口袋(*Gueldenstaedtia verna*)等(表 1),土壤为灰钙土^[21]。

1.2 试验样地与观测项目

在围封样地中选择坡向和地势平坦一致的地段,于 2013 年 8 月中旬草地植被生物量达到最大值时,分别进行单株和种群水平取样,单株每个物种随机选取 25—600 株,分别测量每株高度并用目测法估测其盖度,之后齐地面分株收获。种群水平测定在样地内随机选择 80 个 $1m \times 1m$ 的样方,详细记录每个样方内的物种名称,各物种随机测量 5 株的高度,取平均值代表该物种高度,同时记录各物种的密度及用目测法估测各物种分盖度,之后将样方内植物分物种齐地面收获。收获的植物样品,带回室内,置于烘箱中于 $105^{\circ}C$ 杀青 30 min,

然后于 65 ℃烘干至恒重,称重并计算干重。

表 1 黄土高原典型草原的物种组成及其重要值
Table 1 Species composition and the importance values in grassland of the Loess Plateau

物种 Species	相对高度 Relative height	相对盖度 Relative coverage	相对密度 Relative abundance	重要值 Importance value
长芒草 <i>Stipa bungeana</i>	0.29	0.51	0.25	0.35
阿尔泰狗娃花 <i>Heteropappus altaicus</i>	0.15	0.15	0.15	0.15
黄花蒿 <i>Artemisia annua</i>	0.09	0.06	0.13	0.09
黄花棘豆 <i>Leguminosae</i>	0.02	0.02	0.01	0.02
披针叶黄华 <i>Thermopsis lanceolata</i>	0.04	0.02	0.03	0.03
赖草 <i>Leymus secalinus</i>	0.18	0.02	0.07	0.09
米口袋 <i>Gueldenstaedtia multiflora</i>	0.04	0.06	0.06	0.05
糙隐子草 <i>Cleistogenes squarrosa</i>	0.15	0.17	0.16	0.16
无芒隐子草 <i>Cleistogenes songorica</i>	0.01	0.01	0.01	0.01
二裂委陵菜 <i>Potentilla bifurca</i>	0.04	0.01	0.01	0.02
莓叶委陵菜 <i>Potentilla fragarioides</i>	0.03	0.05	0.01	0.03
野胡麻 <i>Dodartia orientalis</i>	0.01	0.01	0.01	0.01

重要值=(相对高度+相对盖度+相对密度)/3

1.3 数据分析

数据采用 SPSS 20.0 软件进行统计分析。采用留一分析法进行模型的建立与精确度的检验,即在所取样本中一部分作为估测模型参数,另一部分用于检验模型精确性。选用株高(H)和盖度(C)的复合因子(CH)为自变量,采用 $y = ax + b$ 、 $y = ax^2 + bx + c$ 、 $y = ax^b$ 等 3 种最常用的生物量估测模型,建立各物种和各物种单株的生物量估测方程,并通过比较判定系数 R^2 、相对平均误差绝对值 RMA (average absolute value of relative error)和总相对误差 RS(total relative error)确定最佳估测模型,同时比较种群水平和单株水平的植物地上生物量估测模型的差异性。将所选单株水平和种群水平合适生物量方程采用留一法带入到群落调查样方,进行群落生物量估测,以 $1 \pm 10\%$ 作为变化区间,比较两种水平所建生物量估测模型在群落水平的精确性。用 Sigmaplot12.5 进行制图。相对平均误差绝对值 RMA 和总相对误差 RS 计算公式如下^[12]:

$$RS = [(\sum Y_s - \sum Y_g) / \sum Y_g] \times 100\%, (< 10\%, \text{预测方程比较好})$$

$$RMA = \frac{1}{N} \times \sum \frac{|Y_s - Y_g|}{|Y_g|} \times 100\%, (< 30\%, \text{预测方程比较好})$$

式中,N 为实验样本数量;Ys 为生物量实测值;Yg 为生物量估测值。

2 结果与分析

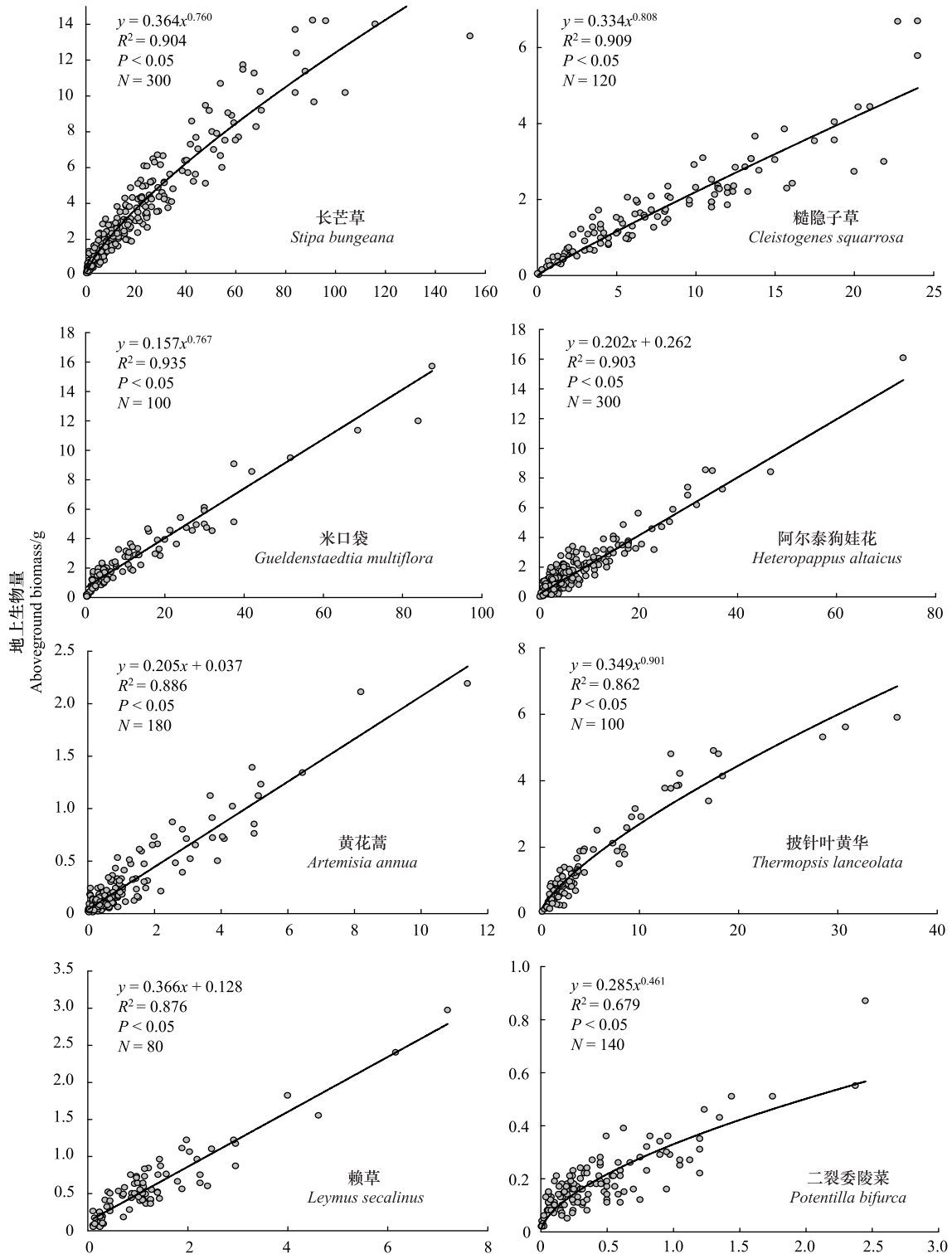
2.1 单株水平生物量估测模型的建立与验证

2.1.1 生物量估测模型的建立

本研究区 12 种植物单株的生物量估测模型均达显著水平 ($P < 0.05$, 图 1), 且各物种的单株植物生物量均随复合因子(CH)增加而增加,但对于不同物种其增长方式并非完全一致。长芒草、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)、披针叶黄华(*Thermopsis lanceolata*)、二裂委陵菜(*Potentilla bifurca*)、莓叶委陵菜(*Potentilla fragarioides*)和无芒隐子草(*Cleistogenes songorica*)等 6 种物种在单株水平上生物量估测的最优模型为 $y = ax^b$, R^2 均大于 0.75; 其中,糙隐子草的相关性最高($R^2 = 0.909$),二裂委陵菜的相关性最低($R^2 = 0.679$)。米口袋、阿尔泰狗娃花、黄花蒿(*Artemisia annua*)、赖草、野胡麻(*Dodartia orientalis*)和黄花棘豆(*Leguminosae*)等 6 种植物在单株水平上生物量估测的最优模型为 $y = ax + b$ 。 R^2 均大于 0.87,米口袋的相关性最高($R^2 = 0.935$),赖草的相关性最低($R^2 = 0.876$)。

2.1.2 生物量估测模型精度检验

基于单株水平所建立的生物量估测模型,采用留一分析法将各物种的生物量估测值与实测值作相关性分析,对建立的生物量估测模型的精确性进行检验。结果表明,各个物种的生物量估测值与实测值相关性均达到了显著水平($P < 0.05$),平均相对误差绝对值 RMA 均在 17% 至 30% 之间,总相对误差 RS (一般应 $< 10\%$) 除野胡麻和二裂委陵菜外均 $< 10\%$ (表 2)。



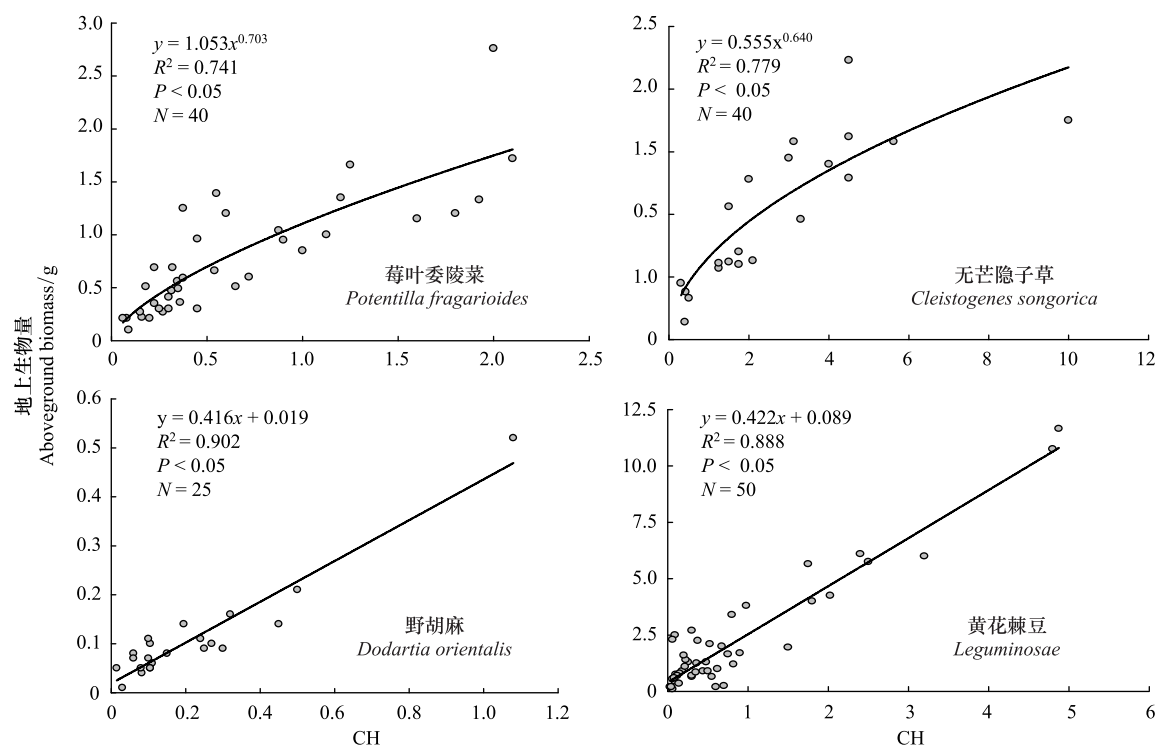


图 1 单株水平各物种最优生物量估测模型

Fig.1 The best estimation models of species in individual level

CH代表植物盖度和高度的乘积 denote the product of vegetation coverage and height; A:长芒草 *Stipa bungeana*; B:糙隐子草 *Cleistogenes squarrosa*; C:米口袋 *Gueldenstaedtia multiflora*; D:阿尔泰狗娃花 *Heteropappus altaicus*; E: 黄花蒿 *Artemisia annua*; F: 披针叶黄华 *Thermopsis lanceolata*; G: 赖草 *Leymus secalinus*; H: 二裂委陵菜 *Potentilla bifurca*; I: 莓叶委陵菜 *Potentilla fragarioides*; J: 无芒隐子草 *Cleistogenes songorica*; K: 野胡麻 *Dodartia orientalis*; L: 黄花棘豆 *Leguminosae*

表 2 单株地上生物量估测模型精确性检验

Table 2 Testing of accuracy of aboveground biomass estimation models in individual level

物种 Species	样本数 Sample size	标准误差 Standard error	<i>r</i>	<i>P</i>	RMA/%	RS/%
长芒草 <i>Stipa bungeana</i>	226	0.036	0.904	0.000 *	28.371	1.594
阿尔泰狗娃花 <i>Heteropappus altaicus</i>	140	0.045	0.889	0.000 *	26.114	2.842
黄花蒿 <i>Artemisia annua</i>	110	0.031	0.896	0.000 *	27.051	9.627
黄花棘豆 <i>Leguminosae</i>	25	0.107	0.756	0.000 *	23.996	0.101
披针叶黄华 <i>Thermopsis lanceolata</i>	40	0.076	0.887	0.000 *	27.712	5.739
赖草 <i>Leymus secalinus</i>	40	0.15	0.645	0.000 *	22.751	0.582
米口袋 <i>Gueldenstaedtia multiflora</i>	50	0.055	0.868	0.000 *	25.608	-7.693
糙隐子草 <i>Cleistogenes squarrosa</i>	55	0.137	0.614	0.000 *	17.255	0.507
无芒隐子草 <i>Cleistogenes songorica</i>	15	0.068	0.991	0.000 *	16.956	8.197
二裂委陵菜 <i>Potentilla bifurca</i>	82	0.194	0.512	0.000 *	26.579	11.749
莓叶委陵菜 <i>Potentilla fragarioides</i>	21	0.151	0.734	0.120 *	27.878	7.654
野胡麻 <i>Dodartia orientalis</i>	31	0.096	0.816	0.000 *	30.179	19.644

* *P*<0.05, RMA (average absolute value of relative error) 和总相对误差 RS (total relative error)

2.2 种群水平生物量估测模型

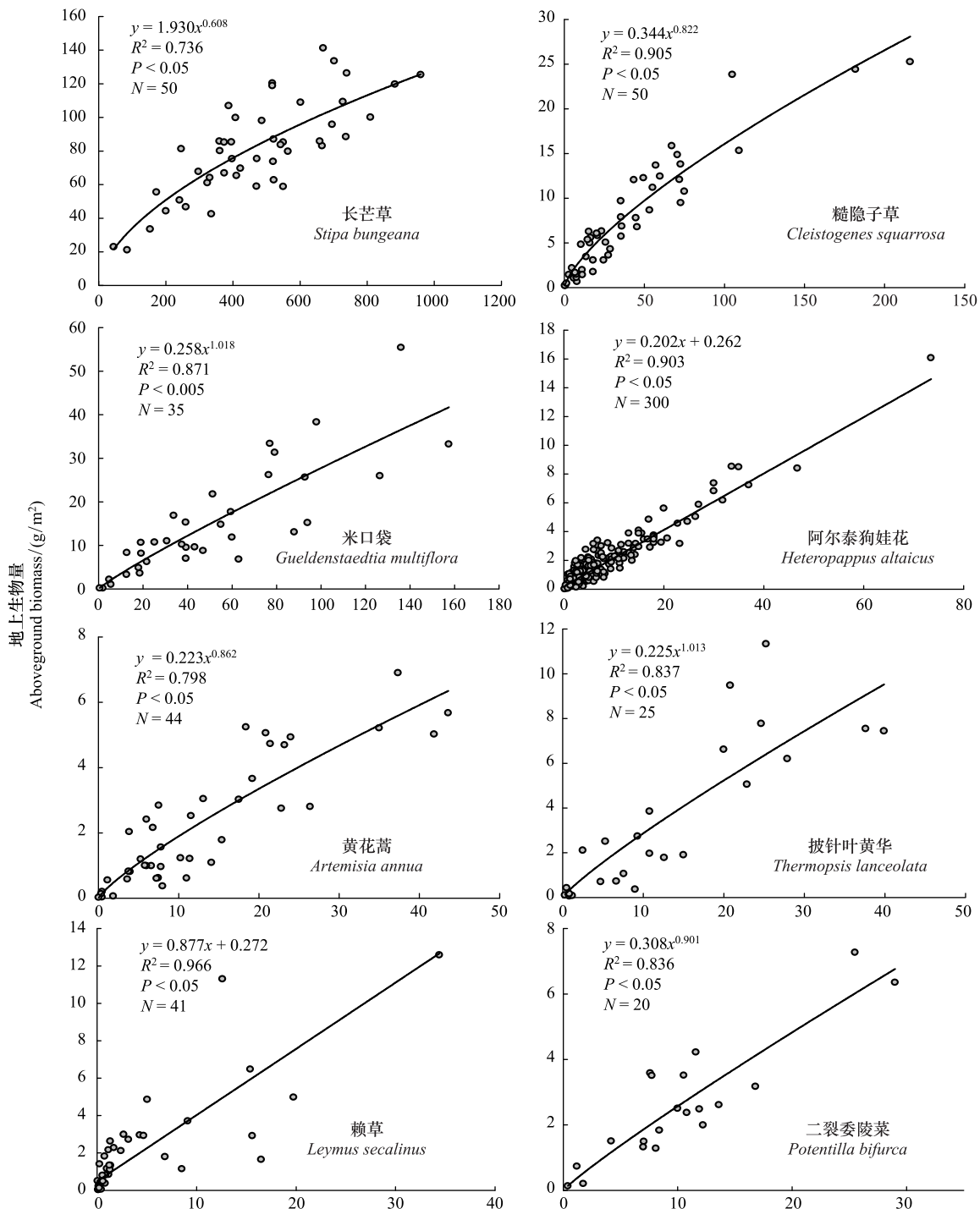
2.2.1 生物量估测模型的建立

由种群水平建立的生物量估测模型均达显著水平 (*P*<0.05, 图 2), 且各物种的生物量均随复合因子 (CH)

增加而增加,所有物种生物量最佳估测模型主要表现为线性函数和幂函数。长芒草、旋风草、狗娃花、黄花蒿、米口袋、苦豆子和二裂委陵菜等 7 种物种的生物量估测的最优模型为 $y = ax^b$ 。 R^2 依次为糙隐子草(0.905) > 米口袋(0.871) > 披针叶黄华(0.837) > 二裂委陵菜(0.836) > 黄花蒿(0.798) > 长芒草(0.736) > 阿尔泰狗娃花(0.540)。赖草、黄花棘豆和其他杂草等 3 种物种生物量估测的最优模型为 $y = ax + b$ 。 R^2 均大于 0.85, 其中,赖草的相关性最高($R^2 = 0.966$),黄花棘豆的相关性最低($R^2 = 0.851$)。

2.2.2 生物量估测模型精度检验

基于种群水平所建立的生物量估测模型,同样采用留一分析法将各物种的生物量估测值与实测值作相关性分析,对建立的生物量估测模型的精确性进行检验,结果表明(表 3),各个物种的生物量估测值与实测值相



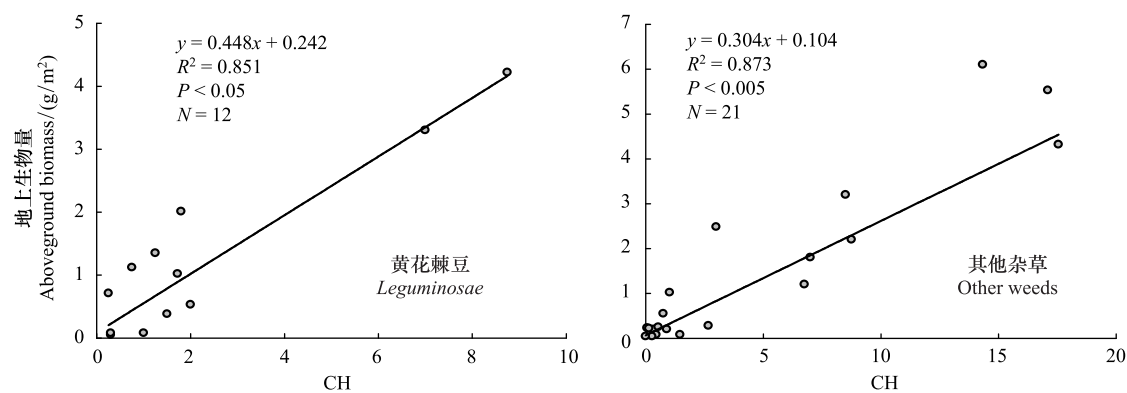


图 2 种群水平各物种最优生物量估测模型

Fig.2 The best estimation models of species in population level

A:长芒草 *Stipa bungeana*;B:糙隐子草 *Cleistogenes squarrosa*;C:米口袋 *Gueldenstaedtia multiflora*;D:阿尔泰狗娃花 *Heteropappus altaicus*;E:黄花蒿 *Artemisia annua*;F:披针叶黄华 *Thermopsis lanceolata*;G:赖草 *Leymus secalinus*;H:二裂委陵菜 *Potentilla bifurca*;I:黄花棘豆 *Leguminosae*;J:其他杂草 Other weeds

关性较好,均达到了显著水平($P<0.05$)。除黄花蒿、黄花棘豆和赖草等三种物种外,其余物种平均相对误差绝对值 RMA 均 $<30\%$,总相对误差 RS 除长芒草和阿尔泰狗娃花外均大于 10% 。

表 3 种群水平地上生物量估测模型精确性检验

Table 3 Testing of accuracy of aboveground biomass estimation models in population level

物种 Species	样本数 Sample size	标准误差 Standard error	r	P	$RMA/\%$	$RS/\%$
长芒草 <i>Stipa bungeana</i>	30	0.285	0.542	0.003 *	23.798	-8.388
阿尔泰狗娃花 <i>Heteropappus altaicus</i>	30	0.118	0.82	0.000 *	27.148	-4.431
黄花蒿 <i>Artemisia annua</i>	24	0.244	0.758	0.000 *	68.641	80.005
二裂委陵菜 <i>Potentilla bifurca</i>	18	0.136	0.941	0.002 *	26.669	10.804
黄花棘豆 <i>Leguminosae</i>	10	0.28	0.761	0.135 *	44.517	38.263
赖草 <i>Leymus secalinus</i>	17	0.047	0.88	0.000 *	30.021	65.572
米口袋 <i>Gueldenstaedtia multiflora</i>	17	0.766	0.723	0.001 *	27.356	33.577
披针叶黄华 <i>Thermopsis lanceolata</i>	14	0.118	0.968	0.000 *	21.95	24.216
糙隐子草 <i>Cleistogenes squarrosa</i>	18	0.092	0.93	0.000 *	24.841	19.217
其他杂草 Other weeds	19	0.531	0.564	0.045 *	28.979	25.911

* $P<0.05$

2.3 群落生物量的估测

分别利用由单株水平和种群水平所建立的单个物种的生物量估测模型,通过累加样方内不同物种的生物量估测值计算 20 个备检样方的总生物量,并且与 20 个备检样方的实测总生物量进行比较。通过图 3(A)可知,由单株水平各物种生物量估测模型所得的估测值与实测值非常接近,多数样方的总生物量估测值与实测值均落在 $y=x/(1\pm10\%)$ 的区域类。而通过种群水平的各物种生物量估测模型所得的估测值均大于实测值,如图 3(B)所示,所有样方的总生物量估测值与实测值均落在 $y=x/(1\pm10\%)$ 的区域上部。

2.4 校正系数的确定

通过生物量估测模型计算得到的估测生物量与实测生物量之间的相对关系可以用线性方程较好的表达出来。由生物量实测值与估测值的线性回归分析结果(表 4)表明:在单株水平上,长芒草、阿尔泰狗娃花、黄花蒿、黄花棘豆、披针叶黄华、赖草、米口袋、糙隐子草、无芒隐子草、二裂委陵菜、莓叶委陵菜和野胡麻的校正系数分别为 1.050、1.028、0.619、0.709、0.938、1.030、0.833、0.923、0.936、1.051、0.961 和 0.794, R^2 值分别为 0.893、0.828、0.860、0.719、0.882、0.889、0.891、0.874、0.981、0.701、0.538 和 0.663,均达到了显著水平($P<0.005$)。

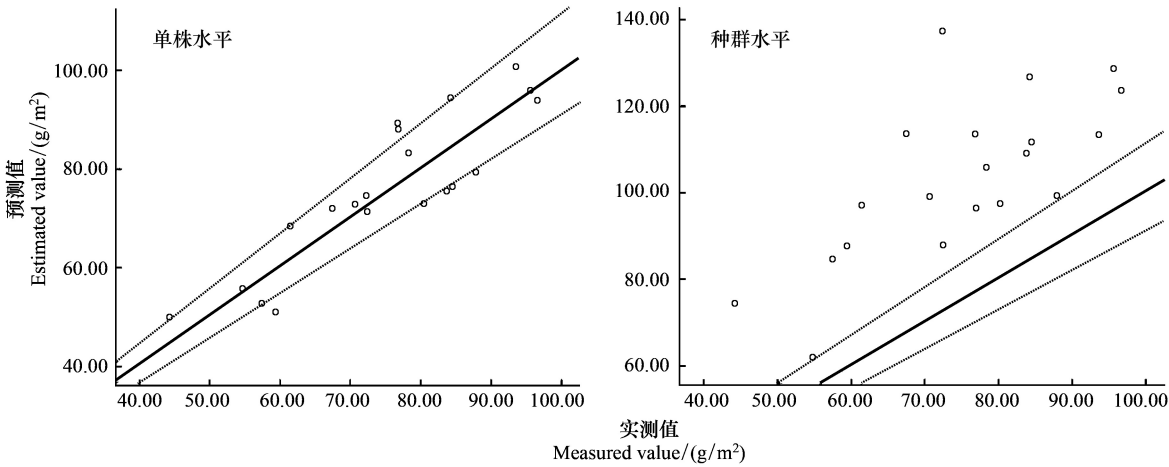


图3 两种不同水平地上总生物量实测值与估测值的比较

Fig.3 Comparison of measured aboveground biomass value and estimated aboveground biomass value in different levels

A:单株水平 Individual level;B:种群水平 Population level

表4 地上生物量估测模型校正系数的确定

Table 4 Determination of the correction factor of aboveground biomass estimation models

水平 Level	物种 Species	拟合方程 Fitting equation	校正系数 Correction coefficient	标准误差 Standard error	R^2	t 值 t value	样本数量 Sample size
单株水平 Individual level	长芒草 <i>Stipa bungeana</i>	$Y = 1.050x$	1.05	0.025	0.893	42.61	226
	阿尔泰狗娃花 <i>Heteropappus altaicus</i>	$Y = 1.028x$	1.028	0.041	0.828	25.468	140
	黄花蒿 <i>Artemisia annua</i>	$Y = 0.619x$	0.619	0.022	0.86	25.303	110
	黄花棘豆 <i>Leguminosae</i>	$Y = 0.709x$	0.709	0.07	0.719	7.333	25
	披针叶黄华 <i>Thermopsis lanceolata</i>	$Y = 0.938x$	0.938	0.054	0.882	16.382	40
	赖草 <i>Leymus secalinus</i>	$Y = 1.030x$	1.03	0.061	0.889	16.708	40
	米口袋 <i>Gueldenstaedtia multiflora</i>	$Y = 0.833x$	0.833	0.038	0.891	19.36	51
	糙隐子草 <i>Cleistogenes squarrosa</i>	$Y = 0.923x$	0.923	0.05	0.874	18.619	53
	无芒隐子草 <i>Cleistogenes songorica</i>	$Y = 0.936x$	0.936	0.068	0.981	14.436	6
	二裂委陵菜 <i>Potentilla bifurca</i>	$Y = 1.051x$	1.051	0.093	0.701	13.088	82
	莓叶委陵菜 <i>Potentilla fragarioides</i>	$Y = 0.961x$	0.961	0.158	0.538	4.451	21
	野胡麻 <i>Dodartia orientalis</i>	$Y = 0.794x$	0.794	0.165	0.663	5.779	21
	长芒草 <i>Stipa bungeana</i>	$Y = 0.924x$	0.924	0.246	0.437	4.407	30
	阿尔泰狗娃花 <i>Heteropappus altaicus</i>	$Y = 0.880x$	0.88	0.09	0.737	8.544	30
种群水平 Population level	黄花蒿 <i>Artemisia annua</i>	$Y = 1.611x$	1.611	0.207	0.715	7.262	24
	二裂委陵菜 <i>Potentilla bifurca</i>	$Y = 1.066x$	1.066	0.167	0.886	6.235	7
	黄花棘豆 <i>Leguminosae</i>	$Y = 0.606x$	0.606	0.28	0.579	2.032	5
	赖草 <i>Leymus secalinus</i>	$Y = 0.344x$	0.344	0.047	0.775	7.184	17
	米口袋 <i>Gueldenstaedtia multiflora</i>	$Y = 4.050x$	4.05	0.733	0.649	4.908	17
	披针叶黄华 <i>Thermopsis lanceolata</i>	$Y = 1.430x$	1.43	0.118	0.937	13.364	14
	糙隐子草 <i>Cleistogenes squarrosa</i>	$Y = 1.129x$	1.129	0.106	0.878	9.3	14
	其他杂草 Other weeds	$Y = 0.725x$	0.725	0.139	0.636	3.965	13
	单株水平 Individual level	$Y = 0.980x$	0.98	0.1	0.794	8.33	20
	种群水平 Population level	$Y = 0.718x$	0.718	0.123	0.524	4.456	20

在种群水平上,长芒草、阿尔泰狗娃花、黄花蒿、二裂委陵菜、黄花棘豆、赖草、米口袋、披针叶黄华、糙隐子草和其他杂草的校正系数分比为 0.924、0.880、1.611、1.066、0.606、0.344、4.050、1.430、1.129 和 0.725,相对应的 R^2 值分别为 0.437、0.737、0.715、0.886、0.579、0.775、0.649、0.937、0.878 和 0.636,均达到了显著水平 ($P < 0.005$)。在群落总生物量上,实测值与估测值之间也存在着比较好的线性关系,单株水平估测的总生物量的校正系数和 R^2 值分别为 0.980 和 0.794,种群水平估测的总生物量的校正系数和 R^2 值分别为 0.718 和 0.524,通过总生物量的校正系数和 R^2 值的比较,说明单株水平所建生物量估测模型优于种群水平所建生物量估测模型。

3 讨论

生物量是研究生态系统基本功能和过程重要参数因子,同时也是研究植物群落结构最重要的特征之一^[22]。研究表明以自变量株高和盖度建立估测模型时,其操作比较简单,而且精确度也比较高^[23]。因此本研究以植被株高(H)和盖度(C)的复合因子(CH)为自变量,分别从单株水平和种群水平对黄土高原典型草地各个物种进行生物量估测模型的建立,同时采用留一法并结合决定系数 r 、相对平均误差绝对值 RMA 和总相对误差 RS 等对所建生物量估测模型精确性进行评估,并通过校正系数以及群落总生物量估测值和实测值比较单株水平和种群水平所建模型的精确性。结果表明,在黄土高原典型草地,通过对生态参数因子的选择与筛选,无论在单株水平还是种群水平,线性和非线性(幂函数)对该区域生物量的拟合效果更好。这可能是因为黄土高原地区,由于降水较少,土壤比较贫瘠等原因,致使该区域植物地上和地下的分配模式和过程发生了变化^[24],也有研究表明其它模型应用比较少的原因是由于其生态学意义不明确,而且容易产生过度拟合现象^[25]。这与张修玉^[26]等研究结果表明线性回归方程在进行草地地上生物量估测时,其具有直观、简单的优点一致。我们采用留一分析法对所建立的生物量估测模型的精确性进行检验。检验结果表明在单株水平各个物种的生物量估测值与实测值相关性较好,均达到了显著水平 ($P < 0.05$),其 r 值均大于 0.6,所有物种生物量估测模型的总相对误差 RS 除在群落中分布较少的中野胡麻和二裂委陵菜外均小于 10%,平均相对误差绝对值 RMA 均小于 30%(图 1)。在种群水平上,虽然各个物种的生物量估测值与实测值相关性均达到了显著水平 ($P < 0.05$),但多数物种平均相对误差绝对值 RMA 大于 30%,总相对误差 RS 除长芒草和阿尔泰狗娃花均大于 10%(图 2),说明通过单株水平建立的物种生物量估测模型的精度优于种群水平建立的物种生物量估测模型的精度。而且通过两种水平对群落总生物量的估测值和实测值进行比较时发现,在单株水平建立的生物量估测模型的实测值与估测值比较接近,均落在 $y = x / (1 \pm 10\%)$ 的区域类,而在种群水平建立的生物量估测模型的估测值均大于实测值,所有样方的总生物量估测值与实测值均落在 $y = x / (1 \pm 10\%)$ 的区域上部(图 3),其也说明单株水平建立的物种生物量估测模型的精度优于种群水平建立的物种生物量估测模型的精度。这与张典业等^[10]人在种群水平,通过提取不同物种生物量密切相关的盖度、高度等植被因子,建立了青藏高原东缘高寒草甸地上生物量的估测模型,地上生物量估测模型在检验时,估测值与实测值拟合效果比较好的结果不相复合。这可能由于在单株水平建立的物种生物量估测模型在提取生态参数因子比较精细,而且样本数也比较多,而在种群水平建立的物种生物量估测模型时,由于盖度以及高度测量的不准确性,产生了比较大的误差。尤其在黄土高原典型草地,由于其植被稀疏以及植被生长的不均一性,通过群落组成以及重要值我们也发现(表 1),在黄土高原典型草原只有长芒草、赖草、狗娃花和黄花蒿的重要值接近或大于 0.1,而其他物种重要值比较小,此时用平均高度代替草层高度进行生物量估测模型的建立更容易产生误差。在校正系数方面也说明了这一点,单株水平建立的生物量的估测模型的校正系数均接近 1,而种群水平的校正系数均偏离了 1(表 4)。因此,在植被比较稀疏或植被生长不均一的草地,通过提取植被因子参数建立生物量估测模型时,我们应通过单株水平而不是通过种群水平建立地上生物量估测模型,这样可以提高生物量估测模型的精确性和适用性。

因此在进行草本生物量以及相关的生态参数因子调查时,应在允许的条件下多增加调查的样本数量以及提高所测生态参数因子的次数,可以通过单株水平进行相关生态因子的提取,从而提高草本样方的生物量估

测模型的精度。本文建立的草本样方的生物量估测模型只适用于黄土高原典型草地,为其他研究者估测黄土高原典型草地生物量提供便利,尤其是对于那些长期在黄土高原典型草地进行长期的固定样方观测相关因素对群落结构的组分、生物量等研究提供了理论基础和依据。对于研究区以外的草地生物量估测还需要进一步验证,由于植被的生长状况会因土壤、气候、群落结构等立地条件的不同而发生变化^[27-29],则生物量估测模型的建立所选择的参数因子也会不同。除此以外,当所测草本相关变量超出所建模型的测定范围时应用我们所建立的生物量估测模型估测生物量还需要进一步验证。

参考文献 (References):

- [1] Piao S L, Fang J Y, Philippe Ciais, Philippe Peylin, Huang Y, Stephen Sitch, Wang T. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China. *Nature*, 2009, 458(7241): 1009-1013.
- [2] Fang J Y, Guo Z D, Piao S L, Chen A P. Terrestrial vegetation carbon sinks in China, 1981-2000. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2007, 50(9): 1341-1350.
- [3] Ma W H, Fang J Y, Yang Y H, Anwar Mohammad. Biomass carbon stocks and their changes in northern China's grasslands during 1982-2006. *Science China Life Sciences*, 2010, 53(7): 841-850.
- [4] J M O Scurlock, K Johnson, R J Olson. Estimating net primary productivity from grassland biomass dynamics measurements. *Global Change Biology*, 2002, 8(8): 736-753.
- [5] Ni J. Carbon storage in grasslands of China. *Journal of Arid Environments*, 2002, 50(2): 205-218.
- [6] Onisimo Mutanga, Andrew K Skidmore. Narrow band vegetation indices overcome the saturation problem in biomass estimation. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25(19): 3999-4014.
- [7] Onisimo Mutanga, Andrew K Skidmore. Hyperspectral band depth analysis for a better estimation of grass biomass (*Cenchrus ciliaris*) measured under controlled laboratory conditions. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2004, 5(2): 87-96.
- [8] Ren H R, Zhouc G S, Zhang X S. Estimation of green aboveground biomass of desert steppe in Inner Mongolia based on red-edge reflectance curve area method. *Biosystems Engineering*, 2011, 109(4): 385-395.
- [9] Duan M J, Gao Q Z, Wan Y F, Li Y, Guo Y Q, Ganzhu Z B, Liu Y T, Qin X B. Biomass estimation of alpine grasslands under different grazing intensities using spectral vegetation indices. *Canadian Journal of Remote Sensing: Journal Canadien de Télédétection*, 2014, 37(4): 413-421.
- [10] 张典业, 牛得草, 陈鸿洋, 张永超, 傅华. 青藏高原东缘高寒草甸地上生物量的估测模型. *山地学报*, 2014, 32(4): 453-459.
- [11] 李春萍, 李刚, 肖春旺. 异速生长关系在陆地生态系统生物量估测中的应用. *世界科技研究与发展*, 2007, 29(2): 51-57.
- [12] 刘陟, 黄奇, 周延林, 李政海, 孙振, 柳琳秀, 米红胤, 樊亚娟. 毛乌素沙地油蒿生物量估测模型研究. *中国草地学报*, 2014, 36(4): 24-30.
- [13] C Redjadj, Antoine Duparc, Sandra Lavorel, K Grigulis, C Bonenfant, Daniel Maillard, S Saïd, A Loison. Estimating herbaceous plant biomass in mountain grasslands: a comparative study using three different methods. *Alpine Botany*, 2012, 122(1): 57-63.
- [14] 黄劲松, 邸雪颖. 帽儿山地区 6 种灌木地上生物量估算模型. *东北林业大学学报*, 2011, 39(5): 54-57.
- [15] Matilla E. Survey of reindeer winter ranges as a part of the Finnish National Forest inventory in 1976-1978. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae*, 1981, 99(6): 1-74.
- [16] Pedro Flombaum, O E Sala. A non-destructive and rapid method to estimate biomass and aboveground net primary production in arid environments. *Journal of Arid Environments*, 2007, 69(2): 352-358.
- [17] N Montès. A non-destructive method to estimate biomass in arid environments: A comment on Flombaum and Sala (2007). *Journal of Arid Environments*, 2009, 73(6/7): 599-601.
- [18] Irena Axmanová, Lubomír Tichý, Zuzana Fajmonová, Petra Hájková, Eva Hettenbergerová, Li C F, Kristina Merunková, Martina Nejezchlebová, Zdenka Otýpková, Marie Vymazalová, David Zelený. Estimation of herbaceous biomass from species composition and cover. *Applied Vegetation Science*, 2012, 15(4): 580-589.
- [19] Piao S L, Fang J Y, Zhou L M, Tan K, Tao S. Changes in biomass carbon stocks in China's grasslands between 1982 and 1999. *Global Biogeochemical Cycles*, 2007, 21(2): GB2002.
- [20] 辛晓平, 张保辉, 李刚, 张宏斌, 陈宝瑞, 杨桂霞. 1982-2003 年中国草地生物量时空格局变化研究. *自然资源学报*, 2009, 24(9): 1582-1592.
- [21] Li X D, Fu H, Li X D, Guo D, Dong X Y, Wan C G. Effects of land-use regimes on carbon sequestration in the Loess Plateau, Northern China. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 2008, 51(1): 45-52.

- [22] 刘长成,魏雅芬,刘玉国,郭柯. 贵州普定喀斯特次生林乔灌层地上生物量. 植物生态学报, 2009, 33(4): 698-705.
- [23] 杨昆,管东生. 森林林下植被生物量收获的样方选择和模型. 生态学报, 2007, 27(2): 705-714.
- [24] 李旭东,张春平,傅华. 黄土高原典型草原草地根冠比的季节动态及其影响因素. 草业学报, 2012, 21(4): 307-312.
- [25] Jay Gao. Quantification of grassland properties: how it can benefit from geoinformatic technologies?. International Journal of Remote Sensing, 2006, 27(7): 1351-1365.
- [26] 张修玉,许振成,宋巍巍,管东生,赵晓光,胡习邦,张钢锋. 西双版纳紫茎泽兰生物量收获的样方选择与模型. 草业科学, 2010, 27(10): 85-90.
- [27] 杨昊天,李新荣,王增如,贾荣亮,刘立超,高艳红,李刚. 腾格里沙漠东南缘 4 种灌木的生物量预测模型. 中国沙漠, 2013, 33(6): 1699-1704.
- [28] 除多,德吉央宗,姬秋梅,唐红. 青藏高原典型草地上生物量遥感估算. 国土资源遥感, 2013, 25(3): 43-50.
- [29] 孙晓芳,岳天祥,王情. 草地上生物量高精度曲面建模. 遥感学报, 2013, 17(5): 1068-1076.