

网络出版时间:2013-07-18 16:03
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20130718.1603.022.html>

人工林土壤养分极化动态理论模型

米彩虹^{1a},刘增文^{1a,2},张晓曦^{1b}

(1 西北农林科技大学 a 资源环境学院,b 水土保持研究所,陕西 杨凌 712100;
2 农业部 西北植物营养与农业环境重点实验室,陕西 杨凌 712100)

[摘 要] **【目的】**建立基于人工林土壤养分循环和枯落物分解的土壤极化模型,旨在为深入认识土壤养分极化成因和预测土壤养分极化趋势提供参考。**【方法】**从人工林生态系统养分循环规律的角度出发,建立人工林土壤养分极化推理和动态模型,通过实验室分解法和野外调查,对模型中主要参数的确定进行分析。**【结果】**分别建立了基于养分循环和枯落物分解的人工林土壤养分极化度推理模型及动态模型,并针对油松、落叶松、侧柏、刺槐、小叶杨、白桦和辽东栎等人工林,确定了模型中的主要参数。**【结论】**由于人工林土壤养分极化受林木对养分的选择吸收利用、枯落物分解等的综合影响,所以从人工林生态系统养分循环规律的角度来建立土壤养分极化动态理论模型是可行的。

[关键词] 人工林;土壤养分;土壤极化

[中图分类号] S714.2 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1671-9387(2013)08-0091-05

Theoretical and dynamic models of soil nutrient polarization in planted forests

MI Cai-hong^{1a}, LIU Zeng-wen^{1a,2}, ZHANG Xiao-xi^{1b}

(1 a College of Natural Resources and Environment, b Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2 Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agri-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: **【Objective】**In this research, models of soil nutrient polarization based on soil nutrient circulation were established. And the causes and tendency of soil polarization can be understood deeply by the models. **【Method】**Theoretical and dynamic models of soil nutrient polarization were developed in view of the nutrient circulation in planted forests. And the main parameters were analyzed by indoor experiment and outdoor survey. **【Result】**Inferential models and dynamic models of polarization in planted forests based on nutrient cycling or leaf litter decomposition were developed respectively. The parameters such as k , ρ , λ and W of the models were studied in the *Pinus tabulaeformis*, *Larix principis-rupprechtii*, *Platycladus orientalis*, *Robinia pseudoacacia*, *Populus simonii*, *Betula platyphylla* and *Quercus liaotungensis* forests as well. **【Conclusion】**Soil polarization was synthetically influenced by the selective absorption and utilization of nutrients by trees and the decomposition of litters. Consequently, it is feasible to develop theoretical and dynamic models based on nutrient cycling in planted forest ecosystem.

Key words: planted forests; soil nutrient; soil polarization

人工林大多为单一树种组成的纯林,由于纯林 树种生物生态学特性的单一性、对物质吸收循环利

* [收稿日期] 2012-10-19
[基金项目] 国家自然科学基金项目(31070630)
[作者简介] 米彩虹(1983—),女,河北赞皇人,在读博士,主要从事森林生态和水土保持研究。E-mail: micaihong@126.com
[通信作者] 刘增文(1965—),男,陕西横山人,教授,博士生导师,主要从事森林生态研究。E-mail: zengwenliu2003@aliyun.com

用的选择性和对环境效应的特殊性,在其长期生长过程中,土壤性质往往会呈现偏离原平衡态并朝正向或负向极端化发展的趋势,这一现象被称为土壤极化^[1]。土壤极化的方向有正有负,其中,正向或增益性极化有利于土壤的改良,而负向或破坏性极化则会导致土壤退化。已经发现,由于土壤极化问题的存在,越来越多树龄偏大或者多代连栽的人工纯林会出现生长发育不良、林分衰败、土壤退化及更新困难等连生(连续生长)或连栽障碍现象^[2-6]。针对这一问题,刘增文等^[7]曾经通过大样本实地采样测定法,对黄土高原的一些典型人工纯林的土壤养分极化趋势和目前土壤养分极化的程度进行了研究。

然而,由于土壤养分极化因地而异,实地大样本采样测定只能得到当时静态的土壤养分极化结果,无法深入认识土壤养分极化的成因和预测土壤养分极化的趋势。所以,从原理上建立土壤养分极化的动态过程模型非常必要。本试验通过对黄土高原不同树种人工纯林生态系统的养分吸收、存留和归还等循环规律及枯落物分解对土壤养分极化的影响等的研究,建立土壤养分极化动态模型,旨在为了解土壤养分极化成因并预测土壤养分极化的趋势提供参考。

1 人工林土壤养分极化度的概念

极化度 $P(t)$ 反映土壤性质离开原相对平衡态的方向和程度,其计算公式为:

$$P(t) = [X(t) - X_0] / X_0. \quad (1)$$

式中: t 为树龄, $X(t)$ 、 X_0 分别为待评土壤和原相对平衡态土壤的某种性质。

$P(t)$ 的值有正有负,表明土壤养分极化是有方向的,正向即增强或积累,负向即减弱或亏损。

为了计算土壤养分极化度 $P(t)$,首先应该确定相对平衡态的土壤性质。对于纯林地而言,土壤性质的相对平衡态应该是指相同立地条件的、人类尚未破坏的、由各种不同针阔树种组成的天然混交林地的土壤性质。由于现实中很难找到这种天然混交林地。所以,一般取不同针叶树种纯林地、不同阔叶树种纯林地和混交林地的平均值近似作为相对平衡态土壤性质(因为不同针阔树种纯林地的土壤养分极化方向不同,取其平均值,可以消除因树种不同造成的影响),具体计算方法如下:

$$X_{i0} = (\bar{X}_{in} + \bar{X}_{ib} + \bar{X}_{im}) / 3. \quad (2)$$

式中: X_{i0} 为相对平衡态土壤第 i 种性质取值, $\bar{X}_{in}$ 、 $\bar{X}_{ib}$ 和 $\bar{X}_{im}$ 分别为当地针叶纯林、阔叶纯林和混交林

土壤第 i 种性质平均值。

2 人工林土壤养分极化度推理模型的建立

2.1 基于养分循环的人工林土壤养分极化度推理模型的建立

根据人工纯林生态系统的养分吸收、存留和归还等循环规律,可建立土壤养分极化度模型如下:

$$X(t) - X_0 = \int [r(t) + I(t) - a(t)] dt. \quad (3)$$

式中: $r(t)$ 为林地枯落叶分解年归还土壤的养分量, $I(t)$ 为随降水和母质风化年输入土壤的养分量, $a(t)$ 为林木从土壤中年吸收的养分量。

假定林地不存在水土流失,并忽略随其他生物迁徙输入和输出的养分,那么公式(1)可转换为:

$$P(t) = \int [r(t) + I(t) - a(t)] dt / X_0. \quad (4)$$

可见,土壤养分极化的方向和速率取决于年归还养分量 $r(t)$ 、 $I(t)$ 和林木从土壤中年吸收养分量 $a(t)$ 的相对大小,当年归还养分量大于年吸收养分量时,土壤发生正向极化;当年归还养分量小于年吸收养分量时,土壤发生负向极化。由于随降水和母质风化年输入土壤养分量 $I(t)$ 一般较少且相对稳定,所以土壤养分极化度 $P(t)$ 主要取决于林地枯落叶年分解归还土壤养分量 $r(t)$ 和林木从土壤中年吸收养分量 $a(t)$ 。其中,枯落叶年分解归还土壤养分量 $r(t)$ 与林地枯落叶积累量和气候环境有关,而林木从土壤中年吸收养分量 $a(t)$ 与林木生长速率有关。

$$\text{已知: } r(t) = d\eta L_t. \quad (5)$$

式中: d 为枯落叶年分解率, η 为枯落叶养分含量, L_t 为林龄 t 时枯落叶积累总量。

此外,根据养分循环原理(即年吸收=年存留+年归还)可以得出:

$$a(t) = m\mu\Delta B_t + \eta l_t. \quad (6)$$

式中: m 为林分密度, μ 为年净增长生物量中的养分含量, ΔB_t 为平均单株生物量的年净增长量, η 为枯落叶养分含量, l_t 为林龄 t 时林地年凋落叶量。

那么可以得出林地土壤养分极化度推理模型为:

$$P(t) = \int [d\eta L_t + I(t) - m\mu\Delta B_t - \eta l_t] dt / X_0. \quad (7)$$

2.2 基于枯落叶分解的人工林土壤养分极化度推理模型的建立

由于枯落叶分解符合 Olson 分解模型^[8] $R =$

$X/X_0 = e^{-kt}$, 其中 R 为枯落叶残留率, X_0 、 X 分别为初始和分解 t 时的枯落叶量, k 为模型参数, t 为分解时间。当 t 为 1 年时, 得枯落叶平均年分解率 $d = 1 - e^{-k}$ 。

应用 Olson 分解模型, 可以构建枯落叶积累总量 L_t 与林地年凋落叶量 l_t 之间的物量平衡模型, 其形式为:

$$L_t = l_t e^{-k} + l_{t-1} e^{-2k} + l_{t-2} e^{-3k} + \dots + l_1 e^{-tk} = \sum_{i=0}^{t-1} l_{t-i} e^{-(i+1)k} \quad (8)$$

又由于林地年凋落叶量为单株树木年凋落叶量与林分密度的乘积, 而单株树木年凋落叶量可由生活叶生物量推算, 生活叶生物量与林木平均胸径呈幂函数正相关, 即:

$$l_t = m\rho(1-\lambda) \cdot aD_t^b \text{ 或} \\ l_t = m\rho(1-\lambda) \cdot a(D_t^2 H_t)^b \quad (9)$$

式中: m 为林分密度, ρ 为由生活叶生物量推算的年凋落叶量系数, λ 为树叶凋落时的干质量损失率, D_t 为林木平均胸径, H_t 为树高, a 、 b 为模型参数。

那么, 现存枯落叶积累总量模型可表达为:

$$L_t = m\rho(1-\lambda)a(D_t^b e^{-k} + D_{t-1}^b e^{-2k} + D_{t-2}^b e^{-3k} + \dots + D_1^b e^{-tk}) = m\rho(1-\lambda)a \sum_{i=0}^{t-1} D_{t-i}^b e^{-(i+1)k} \quad (10)$$

由此可以得出:

$$r(t) = (1 - e^{-k}) \eta m \rho (1 - \lambda) a \sum_{i=0}^{t-1} D_{t-i}^b e^{-(i+1)k} \quad (11)$$

此外:

$$a(t) = m\mu\Delta B_t + \eta l_t = m\mu\Delta B_t + m\eta\rho(1-\lambda)aD_t^b \quad (12)$$

那么, 林地土壤养分极化度推理模型又可表达为:

$$P(t) = \int [(1 - e^{-k}) \eta m \rho (1 - \lambda) a \sum_{i=0}^{t-1} D_{t-i}^b e^{-(i+1)k} + I(t) - m\mu\Delta B_t - m\eta\rho(1-\lambda)aD_t^b] dt / X_0 \quad (13)$$

3 人工林土壤养分极化度动态模型的建立

以 $\delta P(t)$ 反映土壤养分极化度变化速率, 其计算公式为:

$$\delta P(t) = [P(t_2) - P(t_1)] / \Delta t = [X(t_2) - X(t_1)] / X_0 / \Delta t \quad (14)$$

式中: $P(t_1)$ 、 $P(t_2)$ 分别为林龄 t_1 和 t_2 时的林地土壤养分极化度, Δt 为由 t_1 到 t_2 的时间间隔, $X(t_1)$

和 $X(t_2)$ 分别为林龄 t_1 和 t_2 时的林地土壤性质, X_0 为平衡态土壤性质。

那么土壤养分极化度模型又可表示为:

$$P(t) = \int \delta P(t) dt \quad (15)$$

4 人工林土壤养分极化度模型中主要参数的确定

4.1 枯落叶 Olson 分解模型 $R = e^{-kt}$ 中参数 k 的确定

1) 于秋末冬初采集人工林当年枯落叶, 经过仔细挑拣(剔除病虫害叶和腐烂叶)、漂洗、晾干, 用感量 0.01 g 的电子天平准确称取 7.50 g, 装入网眼直径 0.5 mm、大小为 14 cm × 20 cm 的尼龙网袋中, 设 5 个重复。

2) 首先称取 4.0 kg 经充分混合的新鲜土样(采自当地无林荒草地腐殖质层(深度 0~20 cm), 将 5 个 1 m × 1 m 的小样土样混合, 剔除根系、石砾、动物残骸等杂物, 粉碎过孔径 5 mm 筛), 然后以蒸馏水调节土壤湿度为田间持水量的 50% (预先测定土壤的田间持水量, 通过计算确定应加水量), 再经充分混合后装入长 × 宽 × 高为 20 cm × 40 cm × 30 cm 的箱式不透水塑料培养钵中。

3) 将装有枯落叶的 5 个尼龙网袋斜状间隔排列, 埋入装有土壤的培养钵中(保证每个网袋四周均与土壤充分接触, 网袋之间间隔一定距离), 用塑料薄膜覆盖钵口(保湿), 并在薄膜上留 4 个直径 1.5 cm 的通气孔, 放在室内常温下(20~25 °C)进行分解试验培养。每隔 1 周称量 1 次培养钵质量, 根据失水情况, 揭开钵口用喷雾器均匀补充水分, 始终调节土壤湿度不变(培养钵质量保持恒定), 连续培养 345 d 终止。

4) 待分解试验结束后取出尼龙网袋, 置于孔径 0.25 mm 的土壤筛中进行漂洗, 将残留物在 60 °C 下烘干, 用电子天平测定枯落叶分解后的残留量。根据分解前后枯落叶质量的变化, 采用 Olson 分解模型 $R = X/X_0 = e^{-kt}$ 进行拟合, 所得参数 k 见表 1。

4.2 由生活叶生物量推算年凋落叶量系数 ρ 的确定

落叶树种由于所有生活叶都要凋落, 所以生活叶生物量即为年凋落叶量, 即 $\rho = 1.0$; 而对于常绿树种来说, 生活叶中的部分老龄叶会发生凋落, ρ 为脱落老龄叶生物量与全部叶生物量的比值。不同人工林 ρ 值见表 1。

4.3 树叶凋落时的干质量损失率 λ 的确定

1)选定 3~5 株生长健壮、具有代表性的林木作为采样木,分别于树叶凋落前和凋落后采集完好的树木叶片。其中,凋落前的生活叶于旺盛生长末期(9 月中旬)在树冠中部及东、南、西、北 4 个方位混合采集,凋落叶则是于落叶季节(9 月下旬后)在树下地面及时收集新近正常凋落的叶片。将所有采集的生活叶和凋落叶用清水迅速漂洗干净后,在室内晾干叶面上的明水(目的只是为了便于测定叶面积,至于单位叶面积干质量,则等到测完叶面积后统一烘干至恒质量测定)并剪掉叶柄。

2)用扫描式活体叶面积仪,分别对生活叶和凋落叶进行叶面积量测,对于不平整的叶片剪成小片后进行量测。同时,将面积量测后的叶片装入自制纸袋并放在 65℃烘箱中烘干至恒质量后,以感量 0.001 g 的精密电子天平称其质量,计算单位叶面积

干质量。因为叶片测定数量会影响单位叶面积干质量计算结果的准确性,所以以平均单位叶面积干质量不再随抽样叶片数量的增加而发生变化时的抽样数量作为最少测定的叶片数量。实际测定中均以超过最少抽样数量 20% 的样片作为测定数量(油松、落叶松和侧柏按照针叶及鳞状叶的垂直投影面积确定抽样数量)。

3)根据生活叶和凋落叶密度的变化计算树叶凋落前后干质量损失率 λ ,计算公式为: $\lambda=100(W_L-W_F)/W_L$,其中 W_L 、 W_F 分别为生活叶和凋落叶的单位面积干质量(mg/cm^2),测定的不同人工林的 λ 值见表 1。

4.4 林木叶生物量 W 的确定

前人通过大量的生物量测算,已经建立了很多树种以林木平均胸径 D 、树高 H 估算林木叶生物量 W 的模型^[9-15](表 1),可以直接应用。

表 1 几种人工林土壤养分极化度推理模型中不同参数的取值

Table 1 Parameters of soil polarization inferential models for several planted forests

人工林 Planted forests	k	ρ	λ	W
油松 <i>Pinus tabulaeformis</i>	0.602 2	0.25	0.057 3	$0.012\ 1D^{2.193\ 1}$
落叶松 <i>Larix principis-rupprechtii</i>	0.641 5	1.00	0.000 0	$0.095\ 4D^{1.452\ 2}$
侧柏 <i>Platycladus orientalis</i>	2.231 5	0.25	0.101 2	$0.000\ 8D^{3.286\ 2}$
刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i>	0.884 7	1.00	0.026 3	$0.016\ 9D^{2.105\ 2}$
小叶杨 <i>Populus simonii</i>	2.908 2	1.00	0.081 7	$0.101\ 2(D^2H)^{0.685}$
白桦 <i>Betula platyphylla</i>	1.830 0	1.00	0.081 7	$0.007\ 9D^{1.972\ 7}$
辽东栎 <i>Quercus liaotungensis</i>	1.057 6	1.00	0.262 9	$0.231\ 4D^{1.699\ 9}$

注: k 为枯落叶 Olson 分解模型 $R=e^{-kt}$ 中的参数, ρ 为由生活叶生物量推算年凋落叶量的系数, λ 为树叶凋落时的干质量损失率, W 为林木叶生物量, D 为胸径, H 为树高。

Note: k is a parameter of the Olson decomposition model($R=e^{-kt}$), ρ is the coefficient used for calculating annual quantity of leaf litters from the quantity of living leaves, λ is the dry weight loss rate of defoliation, W is the leaf biomass, D is DBH and H is the height of tree.

5 讨 论

土壤性质极化是绝大多数纯林都会发生的一种土壤潜在演变趋势,是由纯林的单一树种组成所决定的,原因完全来自森林内部的自然因素,即由内因引起。刘增文等^[7]应用土壤性质极化理论对黄土高原不同生物气候区主要树种人工纯林土壤性质的极化趋势和极化现状进行了研究,初步得出了一些结果和结论。土壤性质极化只是人工纯林长期生长所导致的土壤性质变化的结果,其根本原因应该在于不同树种所组成的人工纯林生态系统养分循环和利用过程的差异性。只有深入地研究不同人工纯林生态系统的养分循环和利用特征,才能全面认识人工纯林土壤性质极化的过程和机理。本研究分别建立了基于养分循环和枯落物分解的人工林土壤养分极化度推理模型及动态模型,并探索了模型参数的确

定方法,以期为深入认识土壤养分极化的成因,及预测土壤极化趋势提供参考。

由于随降水和母质风化年输入土壤养分量一般较少且相对稳定,所以土壤养分极化度主要取决于林地枯落叶分解年归还土壤养分量和林木从土壤中吸收养分量的大小。本研究构建的人工林土壤养分极化动态模型,是在假定林地不存在水土流失、忽略了随其他生物迁徙输入和输出养分的情况下构建的,是基于林木内部养分循环的理论模型。人工林土壤养分极化是由于内因引起的,气候环境条件等外因对土壤养分极化有影响,但都是通过影响林地养分循环(包括枯落物分解)而发生作用的,即外因通过内因起作用。所以,在基于养分循环和枯落物分解而建立的土壤养分极化度模型中,无需再考虑气候环境条件的影响。在模型参数确定过程中,本研究只提出了室内模拟确定枯落物分解率参数 k 的

方法,具体应用时需根据当地实际环境条件进行修正,或者直接在野外条件下通过枯落物分解试验来确定该参数。

[参考文献]

- [1] 刘增文,段而军,付刚,等. 一个新概念:人工纯林土壤性质的极化[J]. 土壤学报,2007,44(6):1119-1126.
Liu Z W, Duan E J, Fu G, et al. A new concept: Soil polarization in artificial pure forest [J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(6):1119-1126. (in Chinese)
- [2] 焦如珍,杨承栋,孙启武,等. 杉木人工林不同发育阶段土壤微生物数量及其生物量的变化[J]. 林业科学,2005,41(6):163-165.
Jiao R Z, Yang C D, Sun Q W, et al. Changes in soil microbial amount and biomass during the development of Chinese fir plantation [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2005, 41(6):163-165. (in Chinese)
- [3] 杨茂生,谢会成. 引种的华北落叶松人工林对土壤影响的研究[J]. 西北林学院学报,2002,17(3):35-37.
Yang M S, Xie H C. Effect of introduced larch forests on soil [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2002, 17(3):35-37. (in Chinese)
- [4] Joshil M, Bargali K, Bargali S. Changes in physio-chemical properties and metabolic activity of soil in poplar plantations replacing natural broad-leaved forests in Kumaun Himalaya [J]. Journal of Arid Environments, 1997, 35(1):161-169.
- [5] 余常兵,陈防,万开元. 杨树人工林营养及施肥研究进展[J]. 西北林学院学报,2004,19(3):67-71.
Yu C B, Chen F, Wan K Y. Advances in the study of fertilization on poplar plantation [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2004, 19(3):67-71. (in Chinese)
- [6] 方代有. 论粤西退化桉树林地的水土保持生态修复[J]. 亚热带水土保持,2005,17(3):22-25.
Fang D Y. Ecological restoration of degraded forest of *Eucalyptus exserta* in western Guangdong [J]. Subtropical Soil and Water Conservation, 2005, 17(3):22-25. (in Chinese)
- [7] 刘增文,段而军,刘卓玛姐,等. 陕北半湿润黄土丘陵区纯林土壤性质极化[J]. 生态学报,2009,29(10):5696-5707.
Liu Z W, Duan E J, Liu Z M J, et al. Soil polarization of pure forests in the semi-humid loess hilly area of North Shaanxi [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(10):5696-5707. (in Chinese)
- [8] Olson J S. Energy storage and the balance of producers and decomposition in ecological systems [J]. Ecology, 1963, 44:332-341.
- [9] 程堂仁,冯菁,马钦彦,等. 小陇山油松林乔木层生物量相容性线性模型[J]. 生态学杂志,2008,27(3):317-322.
Cheng T R, Feng J, Ma Q Y, et al. Linear compatible models of tree layer biomass of *Pinus tabulaeformis* plantations in Xiaolong Mountains [J]. Chinese Journal of Ecology, 2008, 27(3):317-322. (in Chinese)
- [10] 罗云建,张小全,王效科,等. 华北落叶松人工林生物量及其分配模式[J]. 北京林业大学学报,2009,31(1):13-18.
Luo Y J, Zhang X Q, Wang X K, et al. Biomass and its distribution patterns of *Larix principis-rupprechtii* plantations in northern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2009, 31(1):13-18. (in Chinese)
- [11] 闫家锋,关庆伟,邓送求,等. 徐州云龙山侧柏林生物量和生产力研究[J]. 林业科技开发,2009,23(2):48-50.
Yan J F, Guan Q W, Deng S Q, et al. Study on biomass and productivity of *Platycladus orientalis* plantation in Yunlong Mountain of Xuzhou [J]. China Forestry Science and Technology, 2009, 23(2):48-50. (in Chinese)
- [12] 王佑民,刘秉正. 黄土高原防护林生态特征[M]. 北京:中国林业出版社,1994:161-165.
Wang Y M, Liu B Z. Ecological characteristics of protection forests in Loess Plateau [M]. Beijing: Chinese Forestry Press, 1994:161-165. (in Chinese)
- [13] 李建华,李春静,彭世揆. 杨树人工林生物量估计方法与应用[J]. 南京林业大学学报:自然科学版,2007,31(4):37-40.
Li J H, Li C J, Peng S K. Study on the biomass expansion factor of poplar plantation [J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Science Edition, 2007, 31(4):37-40. (in Chinese)
- [14] 牟长城,万书成,苏平,等. 长白山毛赤杨和白桦-沼泽生态交错带群落生物量分布格局[J]. 应用生态学报,2004,15(12):2211-2216.
Mou C C, Wan S C, Su P, et al. Biomass distribution patterns of *Alnus hirsuta* and *Betula platyphylla*-swamp ecotone communities in Changbai Mountains [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(12):2211-2216. (in Chinese)
- [15] 孟令彬,包维楷,张咏梅,等. 辽东栎萌生个体的地上生物量及其构件分配与生长参数的关系[J]. 山地学报,2006,24(2):202-208.
Meng L B, Bao W K, Zhang Y M, et al. The relationship between growth parameters and total biomass of individual ramets and components distribution of *Quercus Liaotungensis* [J]. Journal of Mountain Science, 2006, 24(2):202-208. (in Chinese)