

# 甘肃省白龙江流域豆科植物根瘤菌共生固氮研究

王卫卫<sup>1</sup>, 阳灿<sup>2</sup>, 胡正海<sup>1</sup>

(1. 西北大学 生命科学院, 陕西 西安 710069; 2. 宝鸡市农业学校, 陕西 宝鸡 721006)

**摘要:** 对甘肃省白龙江流域甘南、陇南的大部分地区豆科植物——根瘤菌资源进行了调查, 共采集 21 属 45 种豆科植物 69 份根瘤样品。从 69 份样品中获 63 株根瘤菌, 对其中 44 株根瘤以 13 种寄主进行了回接试验, 31 株结瘤, 结瘤率 70.5%。该区根瘤一般带有粉红色, 形态比较规则。乙炔还原活力测定结果表明, 88.5% 为有效根瘤。不同种根瘤固氮活性相差不大, 但高于甘肃省其它地区。对豆科植物在蓄水保土, 改良土壤状况中的地位进行了讨论。

**关键词:** 豆科植物; 根瘤菌; 共生固氮; 白龙江流域

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2001)06-0028-05

中图分类号: S154.381

## Rhizobium and Symbiotic Nitrogen Fixation of Legumes in Bailong River Basin of Gansu Province

WANG Wei-wai<sup>1</sup>, YANG Can<sup>2</sup>, HU Zheng-hai<sup>1</sup>

(1. Institute of Life Science, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi Province, PRC;

2. Agricultural Training School of Baoji City, Baoji 721000, Shaanxi Province, PRC)

**Abstract** The total numbers of 69 root nodules which were collected dispersed over 21 genera, 45 species of legumes according to our investigation of rhizobium resources of leguminous plant in Bailong river basin, Gansu province, 63 strains of root nodule bacteria from 69 samples were isolated. Experiments on 44 stains among 31 were inoculated back to 13 species hosts. The shapes of nodules of these plants were circular, ellipse or cudgel with pink in color. The results of acetylene reduction detection showed that 88.5% were effective for nitrogen fixation. Activities of nitrogen fixation in nodules varied littlely and were higher than that in other areas of Gansu province.

**Keywords** legumes; rhizobia; symbiotic nitrogen fixation; Bailong river basin

白龙江流域位于东经 102°46'—104°52', 北纬 33°04'—35°09', 在甘肃省南部甘南藏族自治州的迭部、卓尼、临潭、夏河及陇南地区的文县、武都县境内, 该地区地形地貌复杂, 高差变化剧烈, 气候属北亚热带大陆湿润气候, 一般具有温凉润湿, 冬寒夏凉的高山气候特征。土壤类型以山地棕色森林土、山地棕褐土以及冲积潮土为主。植物种类繁多, 基本上属于北亚热带向暖温带过渡类型<sup>[1]</sup>。

白龙江流域水土流失严重, 中游地区更为剧烈, 已成为我国 4 大泥石流发生区之一<sup>[1]</sup>。

水土流失形成的原因主要是地势陡峻、基岩裂解、植被破坏、大面积陡坡开荒所致。白龙江流域为嘉陵江上游, 其森林植被对涵养水源、保持水土、保护草原及下游农牧业用地的生态环境都具有重要作用。我们对白龙江流域不同生态环境中的豆科植物根瘤菌

及共生结瘤固氮状况的调查, 可为开发这一宝贵资源提供科学依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 根瘤的采集与测定

在豆科植物的生长盛期挖掘根瘤, 将采集的根瘤冲洗干净, 选取个大的新鲜根瘤分成三份, 一份用于酶活性测定, 一份就地分离, 一份装入灭过菌的 CaCl<sub>2</sub> 小瓶或 50% 甘油小瓶带回实验室备用, 同时编号记录时间、地点、生态植被、土壤类型、水分条件等。根瘤固氮活性的测定按上海植物生理研究所固氮室改进的高峰比法<sup>[2]</sup>。

### 1.2 根瘤菌的分离与纯化

将冲洗干净的根瘤用 75% 乙醇及 0.1% HgCl 消毒后, 无菌水冲洗若干次后, 在无菌条件下将根瘤

压碎,挤出汁液,接种于 YMA培养基或别列卓娃培养基,置 28℃培养,将长出的菌落进行 YMA 平板划线,用刚果红 YMA 平板倾注法培养,挑取单个菌落,进行 G 氏染色,镜检<sup>[3]</sup>。

### 1.3 根瘤菌的回接结瘤试验

选取同一或相近寄主植物种子按不同方法处理(如硬皮种子用浓硫酸或砂子擦破种皮等方法),再将种子进行消毒,催芽后,接种培养好的根瘤菌,小粒种子以试管琼脂,大粒种子以三角瓶(或广口瓶)蛭石培养,以少氮或无氮培养液维持营养,光照 7 000~8 000 lx (12 h/d),并加红光辅助,昼夜温差 5℃~10℃,相对湿度 50%~70%<sup>[3]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 结瘤豆科植物及根瘤形态

根瘤是豆科植物根部根瘤菌和植物特异化的共生结构。它的形成是土壤中根瘤菌和植物之间对抗和协调统一的结果,是豆科植物根系被根瘤菌侵染的结果。豆科植物结瘤固氮的特点,集中于根系的根瘤<sup>[4]</sup>。

对白龙江流域不同海拔高度的成县、武都、临潭、夏河等地豆科植物 21 属 45 种结瘤情况进行了调查,采集根瘤样品 69 份。这些豆科植物均能自然结瘤。白龙江流域不同地区生态条件不同,豆科植物生活习性

也比较多样,根瘤具有多种特征(表 1),一般生于山地草原,天然草场和林间湿地的豆科植物 1 a 生草本居多,其根瘤也是 1 a 生,在形态上较为规则,一般为圆形,长圆形,并带有粉红色,而分布于阳坡地带的多年生豆科乔木、灌木,其根瘤形态多为长柱状,且多具分叉,其颜色以白色、褐色、黄色者居多,着生部位多居于侧根、须根上,主根上很少有瘤(表 1)。

白龙江流域豆科植物根瘤的形态特征、颜色变化及着生部位与甘肃其它地区<sup>[5]</sup>或新疆干旱地区<sup>[5]</sup>相比有较大差异。豆科植物的根瘤形态主要与植物有关,同属不同种的豆科植物根瘤形态往往是相似的。根瘤菌侵染寄主,寄主植物或是缺乏感染线或是感染线分枝不广,缺乏永久分生组织,则根瘤多呈圆形或长圆形。

通过感染线来感染寄主,寄主植物具有永久分生组织则根瘤通常是无限生长的,一般呈长柱形、棒状或指状。可见豆科植物根瘤形态涉及到宿主植物的遗传因子<sup>[5]</sup>而与根瘤菌种类关系不大。具有固氮活性的有效根瘤较大,由于豆血红蛋白的存在而呈粉红色。豆血红蛋白在根瘤中起重要作用,它向类菌体提供低浓度和高流量的氧。这是进行固氮作用的必备条件<sup>[3]</sup>。我们在白龙江流域的调查分析结果也证实了这一点(表 1)。

表 1 白龙江流域豆科植物结瘤状况

植物名称(属)	种数	根瘤形态	颜色	大小/mm	着生部位
黄芪 ( <i>Astragalus</i> )	5	棒状、指状	粉红色、白色	1~3	主根、侧根或须根
锦鸡儿 ( <i>Caragana</i> )	1	棒状、长圆形	白色、浅棕色	3~7	侧根、须根
银豆 ( <i>Falcata</i> )	1	圆形	黄色	1~2	主根、侧根
大豆 ( <i>Glycine</i> )	2	圆形	黄色	2~4	主根、侧根
岩黄芪 ( <i>Hedysarum</i> )	1	指状、长圆形	棕色、黄色	2~6	侧根、须根
鸡眼草 ( <i>Kummerowia</i> )	1	圆形	黄色	1~2	侧根、须根
香豌豆 ( <i>Lathyrus</i> )	1	棒状、指状	粉红色	1~3	侧根、须根
胡枝子 ( <i>Lespedeza</i> )	3	圆形、长圆形	黄色、棕色	1~3	侧根、须根
百脉根 ( <i>Lotus</i> )	2	圆形	黄色	1~3	主根、侧根
苜蓿 ( <i>Medicago</i> )	3	棒状、指状	粉红色	1~3	主根、侧根、须根
草木樨 ( <i>Medilotus</i> )	1	指状	白色、粉红色	1~3	侧根
红花草 ( <i>Ombrychis</i> )	1	棒状、指状具分叉	粉红色	3~12	主根、侧根、丛生
棘豆 ( <i>Oxytropis</i> )	2	圆形、长圆形	粉红色	2~4	主根、侧根、须根
菜豆 ( <i>Phaseolus</i> )	4	圆形	白色、浅黄色	2~4	主根、侧根、须根
豌豆 ( <i>Pisum</i> )	1	圆形	白色、浅黄色	1~3	主根、侧根
刺槐 ( <i>Robinia</i> )	1	长圆形	黄色	2~4	侧根、须根
槐属 ( <i>Sophora</i> )	1	长棒状	浅棕色	4~7	侧根、须根
三叶草 ( <i>Trifolium</i> )	3	圆柱状	粉红色或白色	0.5~1	主根、侧根、须根
野豌豆 ( <i>Vicia</i> )	11	长棒状具分叉	粉红色、白色	0.5~1	侧根、须根
豇豆 ( <i>Vigna</i> )	1	圆形、长圆形	白色、浅黄色	2~7	主根、侧根

## 2.2 根瘤菌的种类

我们从所采集的 21 属 45 种豆科植物中的 69 个根瘤样品中分离、纯化获得了 63 株根瘤菌,并对其中 44 株已经鉴定的豆科植物根瘤分离物以直立黄芪 (*Astragalus adsurgens*)、大豆 (*Glycine max*)、杨柴 (*Heaysarum mongolicum*)、鸡眼草 (*Kummerowia stipulacea*)、紫花苜蓿 (*Medicago sativa*)、红豆草

(*Ondrychis viciifolia*)、菜豆 (*Phaseolus vulgaris*)、豌豆 (*Pisum sativum*)、三叶草 (*Trifolium pratense*)、长柔毛野豌豆 (*Vicia villosa*)、蚕豆 (*Vicia faba*)、箭舌豌豆 (*Vicia sp.*) 等 13 种原寄主植物或认为是近亲的寄主植物间进行回接鉴定,其中有 31 株可以结瘤,它们的回接结率为 70.5%,根瘤菌回接实验结果见表 2 所示。

表 2 根瘤菌回接实验结果

回接寄主植物	结瘤菌株	未结瘤菌株
直立黄芪 ( <i>Astragalus adsurgens</i> )	G130, G141,	G112, G117, G147, G149, G152, G135
大豆 ( <i>Glycine max</i> )		G124, G142, G105
杨柴 ( <i>H. mongolicum</i> )	G101	
鸡眼草 ( <i>K. stipulacea</i> )	G126	
紫花苜蓿 ( <i>M. sativa</i> )	G082, G086, G088, G106	
白花草木樨 ( <i>M. albus</i> )	G098	
红豆草 ( <i>O. viciifolia</i> )		G096
菜豆 ( <i>P. vulgaris</i> )	G083, G099, G127, G128	G084, G129
豌豆 ( <i>P. sativum</i> )	G136	
三叶草 ( <i>T. pratense</i> )	G097, G139	G125
长柔毛野豌豆 ( <i>V. villosa</i> )	G087, G089, G090, G104, G116, G118, G123, G133, G134, G141, G146	
蚕豆 ( <i>V. faba</i> )	G137	
箭舌豌豆 ( <i>Vicia. sp.</i> )	G120, G131, G145	

由于根瘤菌按互接种族进行分类存在很多问题,陈文新先生<sup>[6]</sup>曾在数值分类研究中提到西北地区某些根瘤菌的分类地位,并且用现代化的分类方法确定了独立的一种——天山根瘤菌 (*Rhizohium tianshanense sp. nov.*),李颖以同期分离的根瘤菌聚类分析证明未知菌群差异明显,故如何确定白龙江流域根瘤菌的种群地位尚有待进一步探讨。

## 2.3 根瘤菌—豆科植物共生固氮活性

对白龙江流域 52 份根瘤样品的乙炔还原活力进行了测定,其结果详见表 3,其中 88.5% 为有效根瘤各植物根瘤的固氮活性差别较大,活性最高者为采于夏河蒿子沟的 154 号样品米口袋状棘豆,为 37.73  $\mu\text{mol}/(\text{g}^\circ\text{h})$ ,小于 1  $\mu\text{mol}/(\text{g}^\circ\text{h})$  者仅占到总数的 34.6%。

表 3 白龙江流域豆科植物固氮活性

编号	植物名称	采样地点	海拔 /m	生育期	乙炔还原活性 / ( $\mu\text{mol}^\circ\text{g}^{-1}\text{h}^{-1}$ )
117	鄂西黄芪 ( <i>Astragalus aroninoides</i> )	文县刘家坪	1530	结实期	1.41
130	鄂西黄芪 ( <i>A. coroninoides</i> )	文县高楼山	2040	开花、结实期	0.27
122	葛氏黄芪 ( <i>A. craibianus</i> )	文县刘家坪	1800	结实期	0.00
147	黄芪 ( <i>Astragalus sp.</i> )	临潭白家门	2540	营养期 (花前)	4.16
149	黄芪 ( <i>Astragalus sp.</i> )	临潭店子乡	2900	营养期 (花前)	6.02
152	黄芪 ( <i>Astragalus sp.</i> )	夏河蒿子沟	2160	开花期	5.42
153	矮锦鸡儿 ( <i>Cargana pyymaea</i> )	夏河蒿子沟	2160	开花期	5.46
129	银豆 ( <i>Falcata japonica</i> )	文县高楼山	2040	营养期 (花前)	0.89
124	大豆 ( <i>Glycina max</i> )	文县刘家坪	1530	营养期 (花前)	19.64
142	大豆 ( <i>Glycina max</i> )	武都两水	1410	营养期 (花前)	2.50
105	野大豆 ( <i>Glycine soju</i> )	文县桥头乡	1400	营养期 (花前)	0.17

续表 3

编号	植物名称	采样地点	海拔 /m	生育期	乙炔还原活性 / ( $\mu\text{mol g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ )
101	岩黄芪 ( <i>Hedysarum sp.</i> )	武都县店沟	950	开花、结实期	0.17
126	鸡眼草 ( <i>Kummerowia stipullucea</i> )	文县范坝乡	650	营养期 (花前)	5.97
120	牧地香豌豆 ( <i>Lathyrus pilosus</i> )	文县刘家坪	1530	开花期	0.00
145	牧地香豌豆 ( <i>Lathyrus pilosus</i> )	临潭白家门	2540	开花期	0.60
140	绿叶胡枝子 ( <i>Lespedeza buergeri</i> )	文县高楼山	1720	开花期	0.50
121	胡枝子 ( <i>Lespedeza sp.</i> )	文县刘家坪	1530	开花期	—
109	达手里胡枝子 ( <i>Lespedeza davurica</i> )	文县高楼山	1750	营养期 (花前)	3.12
131	百脉根 ( <i>Lotus comiculutus</i> )	文县高楼山	1720	开花、结实期	0.11
135	百脉根 ( <i>Lotus comiculutus</i> )	文县高楼山	1720	开花、结实期	0.71
119	百脉根 ( <i>Lotus comiculutus</i> )	文县刘家坪	1530	开花期	0.00
082	天兰苜蓿 ( <i>Medicago lupulina</i> )	成县旭沙镇	910	营养期 (花前)	0.68
086	野苜蓿 ( <i>Medicago falcate</i> )	成县南部	910	开花期	8.29
088	矩镰荚苜蓿 ( <i>M. archidusisnicolai</i> )	成县南部	910	结实期	6.67
106	野苜蓿 ( <i>Medicago falcate</i> )	文县桥头乡	1400	结实期	8.36
138	天兰苜蓿 ( <i>Medicago lupulina</i> )	文县高楼山	1720	开花、结实期	0.86
098	草木樨 ( <i>Medilctus suaneolens</i> )	甘泉	1750	营养期 (花前)	1.06
096	红豆草 ( <i>Onobrychis vicifolia</i> )	甘泉杨家湾	1750	开花期	0.31
150	小花棘豆 ( <i>Oxytropis glabra</i> )	临潭店子乡	2900	营养期 (花前)	—
154	米口袋状棘豆 ( <i>O. gueldestactioides</i> )	夏河蒿子沟	2160	开花期	37.73
099	红小豆 ( <i>Phaseolus calcaratus</i> )	成县城郊	1750	营养期 (花前)	0.40
083	菜豆 ( <i>Phaseolus vulgaris</i> )	成县抛沙镇	910	开花期	3.05
084	白豆角 ( <i>Phaseolus sp.</i> )	成县抛沙镇	910	开花期	6.48
127	菜豆 ( <i>Phaseolus vulgaris</i> )	文县马泉乡	700	开花期	0.97
128	绿豆 ( <i>Phaseolu radiatus</i> )	文县马全乡	700	营养期 (花前)	0.00
136	豌豆 ( <i>Pisum sativum</i> )	文县高楼乡	1720	开花期	4.17
102	刺槐 ( <i>Robinia. pseudoacacia</i> )	武都县甘沟子	820	结实期	0.00
107	白刺花 ( <i>Sophora vicifolia</i> )	文县桥头乡	1400	结实期	0.63
109	红花三叶草 ( <i>Trifolium pratense</i> )	甘泉杨家湾	1750	营养期 (花前)	—
125	白花三叶草 ( <i>Trifilium repens</i> )	刘家坪	1300	营养期 (花前)	0.00
139	三叶草 ( <i>Trifolium sp.</i> )	文县高楼山	1720	营养期 (花前)	252
123	山野豌豆 ( <i>Vicia amoena</i> )	文县刘家坪	1500	开花期	—
090	山野豌豆 ( <i>Vicia amoena</i> )	成县小川乡	1250	营养期 (花前)	0.52
133	窄叶野豌豆 ( <i>Vicia angustifalia</i> )	文县高楼乡	1720	开花、结实期	1.34
103	山齿萼野豌豆 ( <i>Vicia bungei</i> )	文县桥头乡	1400	结实期	0.00
118	广布野豌豆 ( <i>Vicia craca</i> )	文县刘家坪	1530	结实期	—
137	蚕豆 ( <i>Vicia faba</i> )	文县高楼山	1720	结实期	3.03
089	硬毛果野豌豆 ( <i>Vicia hirsute</i> )	成县南部	910	结实期	1.77
091	野豌豆 ( <i>Vicia sepium</i> )	成县小川乡	1250	营养期 (花前)	0.12
087	救荒野豌豆 ( <i>Vicia sativa</i> )	成县南部	910	结实期	1.39
046	救荒野豌豆 ( <i>Vicia sativa</i> )	临潭白家门	2540	开花期	1.96
116	救荒野豌豆 ( <i>Vicia sativa</i> )	文县刘家坪	1530	结实期	6.05
134	救荒野豌豆 ( <i>Vicia sativa</i> )	文县高楼山	1720	营养期 (花期)	0.85
132	野豌豆 ( <i>Vicia sp.</i> )	文县高楼山	1720	开花、结实期	2.38
144	野豌豆 ( <i>Vicia sp.</i> )	临潭白家门	2540	营养期 (花前)	18.28
104	野豌豆 ( <i>Vicia sp.</i> )	文县桥头乡	1400	结实期	0.26
085	豇豆 ( <i>Vigna sineasis</i> )	成县抛沙镇	910	营养期 (花前)	3.36

### 3 结 论

影响豆科植物结瘤固氮的生态因素是十分复杂的,而产生固氮功能是由根瘤菌和寄主植物两方面的遗传因素所决定。根瘤菌-豆科植物共生固氮是一个耗能过程。固定 1 kg 氮化合物要消耗 10 kg 碳水化合物,豆科植物光合作用获得能量约有 5%~10% 用于固氮,在自然条件下,土壤水分、营养元素、光合作用的差异对植物生长有影响,从而同一植物在不同地点和海拔高度,固氮酶活性也不相同。

豆科植物共生固氮可提供豆科植物本身的氮素和增肥地力,是维持土壤持久生长力的一个重要生态反映,是非栽培地区输入土壤系统氮素的主要来源。白龙江流域这些豆科植物经过长期的自然选择,逐步适应了该区的生态环境,可以被根瘤菌侵染且具有固氮酶活性,这无疑是良好的自然资源。深入研究和开发利用这些自然资源将会使豆科植物在该地区的改良土壤、防止水土流失、涵养下游水源等方面发挥更大作用。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 尹祚栋,赫卓峰. 白龙江、洮河林区综合考察报告 [C]. 见尹祚栋,赫卓峰主编,白龙江、洮河林区综合考察论文集. 上海科学技术出版社, 1991, 1-9.
- [2] 中国科学院上海植物生理研究所固氮室. 共生固氮研究中乙炔还原简易峰高比法 [J]. 植物学报, 1977, 16: 382-384.
- [3] Vincent J. H. A manual for the practical study of root-nodule bacteria [M]. Blackwell Scientific Publication. London Oxford of Edinburgh, 1970. 128-214.
- [4] Allen O N, Allen E K. The leguminosae, A source book of characteristic, uses and nodulation [M]. Wisconsin The Unit of Wisconsin Press. 1981. 71.
- [5] 关桂兰,王卫卫,杨玉锁. 新疆干旱地区固氮生物资源 [M]. 北京: 科学出版社, 1991. 29-43.
- [6] Wenxin CHEN, Entao WANG, Suying WANG. Characteristics of *Rhizobium tianshanense* sp. nov., a Moderately and Slowly Growing Root Nodule Bacterium Isolated from an Arid Saline Environment in Xinjiang. [J]. Int. J. Sys. Bacteriology. 1995, 45(1): 153-159.
- (上接第 18 页)
- [5] Flanagan D. C. WEPP CD-ROM. 2001 Vision [Z].
- [6] Woodward D E. Method to predict cropland ephemeral gully erosion. Special Issue Soil Erosion Modeling at the Catchment Scale [J]. Catena. 1999, 37(3-4). 393-399.
- [7] Sdorochuk A. Dynamic and static models of gully erosion. Special Issue Soil Erosion Modeling at the Catchment Scale [J]. Catena. 1999, 37(3-4). 401-414.
- [8] 江忠善,王志强,刘志. 黄土丘陵区小流域土壤侵蚀空间变化定量研究 [J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1996, 2(1): 1-10.
- [9] 蔡强国,陆兆熊,王贵平. 黄土丘陵沟壑区典型小流域侵蚀产沙过程模型 [J]. 地理学报, 1996(2): 108-116.
- [10] 胡良军,李锐,杨勤科. 基于 GIS 的区域水土流失评价研究 [C]. 全国区域水土流失快速调查与管理信息系统学术研讨会论文集. 1999. 42-45.
- [11] 江忠善,宋文经. 黄河中游黄土丘陵沟壑区小流域产沙量计算 [C]. 第一次河流泥沙国际学术讨论会文集, 北京: 光华出版社. 1980. 63-72.
- [12] 牟金泽,熊贵枢. 陕北小流域产沙量预报及水土保持措施拦沙计算 [C]. 第一次河流泥沙国际学术讨论会文集. 北京: 光华出版社, 1980. 63-72.
- [13] 尹国康,陈钦彦. 黄土高原小流域特性指标与产沙统计模式 [J]. 地理学报, 1989, 44(1): 31-45.
- [14] 王星宇. 黄土地区流域产沙数学模型 [J]. 泥沙研究, 1987(3): 41-46.
- [15] 汤立群,陈国祥,蔡名扬. 黄土丘陵区小流域产沙数学模型 [J]. 河海大学学报, 1990, 18(6): 10-16.
- [16] 陈国祥,谢树楠,汤立群. 黄土高原地区流域侵蚀产沙模型研究 [J]. 见: 黄土高原水土保持. 郑州: 黄河水利出版社, 1996. 213-229.
- [17] 牟金泽,孟庆枚. 降雨侵蚀土壤流失方程的初步研究 [J]. 中国水土保持, 1983(6): 25-27.
- [18] 张宪奎,许靖华,卢秀琴,等. 黑龙江省土壤侵蚀方程的研究 [J]. 水土保持通报, 1992, 12(4): 1-9.
- [19] 周伏建,陈明华,林福兴,等. 福建省土壤流失预报研究 [J]. 水土保持通报, 1995, 15(1): 25-30, 36.
- [20] 林素兰,黄毅,捏振刚,等. 辽北低山丘陵坡耕地土壤流失方程的建立 [J]. 土壤通报, 1997, 28(6): 251-253.
- [21] 杨子生. 滇东北山区坡耕地土壤流失方程研究 [J]. 水土保持通报, 1999, 19(1): 1-9.
- [22] 江忠善. 黄土高原土壤侵蚀流失预报方程中降雨侵蚀力和地形因子的研究 [J]. 中国科学院西北水土保持研究所集刊, 1998, 第 7 集. 40-45.