

径流曲线法模型参数在黄土地区的优化研究

王英^{1,3}, 黄明斌^{1,2}

(1. 中国科学院 水利部 水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100;
2. 西北农林科技大学, 陕西 杨凌 712100; 3. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘要: 降雨径流是引起土壤侵蚀的主要动力, 因此准确预测不同下垫面条件下的径流量是进行土壤侵蚀预报和水土流失治理的关键。SCS—CN 方法是国际上预测无径流观测资料地区降水产流的主要模型。利用黄土高原地区 6 个试验小区的 153 场径流试验资料, 选取 3 种具有代表性的土地利用方式: 谷子、苜蓿和高粱, 对 SCS—CN 方法在黄土高原的适应性进行了初步检验, 优化出了适应黄土高原地区 3 种土地利用方式的模型参数。结果表明, 优化后的模型参数对降雨径流的预测精度明显优于标准 SCS—CN 法; 优化后的 λ 值为 0.01, 优化的谷子、苜蓿和高粱地 CN_2 值分别是 74, 74, 72。

关键词: 径流曲线法; 径流; 初损率; 黄土高原

文献标识码: B

文章编号: 1000—288X(2008)01—0054—05

中图分类号: TV121, TM743

Optimizing Parameters of SCS—CN Method for Application on the Loess Plateau

WANG Ying^{1,3}, HUANG Ming-bin^{1,2}

(1. The State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Graduate University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)

Abstract: Runoff is the main factor responsible for soil erosion, so an accurate estimation of runoff is the key to predict and control soil erosion. The Soil Conservation Service curve number (SCS—CN) method is widely used for predicting direct runoff from rainfall in the area without observed runoff data. Using data of 153 runoff events from 6 experimental plots with three landuse types of millet, alfalfa, and sorghum on the Loess Plateau, the applicability of SCS—CN method is validated and the parameters are optimized. Results indicate that the accuracy of runoff prediction by the SCS—CN method with optimized λ and CN_2 values is better than that of the standard CN method. The optimized λ value is 0.01 and the CN_2 values are 74, 74, and 72 for millet, alfalfa, and sorghum, respectively.

Keywords: SCS—CN method; runoff; initial abstraction rate; Loess Plateau

黄土高原水土流失严重, 地形破碎, 降雨产汇流规律复杂多样。降雨径流是引起土壤侵蚀的主要动力^[1], 因此定量计算不同下垫面条件下的径流量, 对认识土壤侵蚀发生规律, 开展水土流失预报以及水土资源的合理利用和评价都有重要意义。而建立原理清晰, 使用方便的产流模型是开展地表径流量定量计算的关键。径流曲线法 (Soil Conservation Service curve number method) 是美国农业部土壤保持局 (USDA SCS) 于 20 世纪 50 年代开发的用来估算地表径流量的模型, 该模型计算过程简单, 所需参数较少, 许多美国农业部 SCS 系列模型, 如非点源模型、

CNPS 模型、CREAMS 模型、ANSWERS 早期的 A GNPS 模型^[2-4]等均利用它来进行无径流资料地区的径流估算。我国学者在 20 世纪 80 年代开始利用 SCS—CN 模型预报流域产流。罗利方等 (2002) 分析了黄土高原 CN 值与土地利用和土地坡度的关系^[5], 得出有意义的结论。Woodward 等 (2004) 研究发现 90% 的初损率 λ 值小于 0.2^[6], 利用美国的降雨径流资料修正了初损率 λ 和 CN 值。 λ 值是 SCS—CN 方法进行精确径流估算的一个重要的影响因素, 特别是对小降水事件的径流深估算具有非常重要的意义。Ponce 和 Hawkins (1996) 指出, SCS—CN 模型对 CN

收稿日期: 2007-08-01

修回日期: 2007-11-01

资助项目: “973 计划”课题 (2007CB407201); 国家自然科学基金 (40471062)

作者简介: 王英 (1982—), 女 (汉族), 山东省聊城市人, 在读硕士研究生, 研究方向为生态水文。E-mail: yingwang24@126.com。

通讯作者: 黄明斌 (1968—), 男 (汉族), 湖北省钟祥市人, 研究员, 博士生导师, 研究方向为生态水文和土壤物理。E-mail: hmdbd@nwsuaf.edu.cn。

值的敏感性过高,对 CN 值准确性的要求也很高^[7],而 CN 值是一个对研究区的气候、地形、植被状况、土壤条件进行综合反映的参数,由于各地区情况千差万别必然造成各地区的 CN 值不同,所以要根据黄土高原的气候、地貌等对初损率 值和 CN 进行优化。

本文详细介绍了 SCS—CN 模型的基本原理和计算步骤,利用黄土高原试验小区的降雨径流等观测资料,对标准 SCS—CN 法和 Woodward 法在黄土高原的适应性进行评价,并在此基础上对模型参数 和 CN 进行修正,使之能更好地应用于黄土高原地区。

1 SCS - CN 模型的基本原理

径流曲线法是以水量平衡(方程 1)和两个基本假定为基础建立的^[8]。第一个假定:直接径流与潜在最大径流的比等于入渗和潜在最大保持量的比(方程 2);第二个假定:初损量与潜在最大保持量成比例(方程 3)。

$$P = I_a + F + Q \tag{1}$$

$$\frac{Q}{P - I_a} = \frac{F}{S} \tag{2}$$

$$I_a = S \tag{3}$$

式中: P——降雨量 (mm); I_a——初损 (mm); F——实际保持量 (mm); Q——实际径流 (mm); S——潜在最大保持量 (mm); ——初损率。

方程(1),(2),(3)结合解得 Q 的表达式:

$$Q = \frac{(P - S)^2}{P + (1 -)S} \quad (P > S); \text{否则 } Q = 0 \tag{4}$$

标准的 SCS—CN 法取 0.2 作为 的值,方程(4)变为 SCS—CN 的典型计算公式:

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad (P > 0.2S) \tag{5a}$$

$$Q = 0 \quad (P \leq 0.2S) \tag{5b}$$

为了实际应用的方便,S 用无因次系数 CN 来表示,即曲线数(curve number),且 0 < CN < 100:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \tag{6}$$

CN 值的确定由土地覆被、土地管理和水文土壤组决定,首先由水文土壤组定义指标确定土壤类型(表 1)^[10],然后查 SCS 手册得到不同土地利用状况下的 CN₂ 值。根据前 5 d 降雨量将土壤前期湿度条件(AMC)划分为 3 个等级(表 2): AMC 为干旱情况,AMC 为一般情况,AMC 为湿润情况^[10]。根据查得的 CN₂ 利用方程(7),(8)来计算 CN₁ 和 CN₃,然后根据方程(5),(6)预报径流^[7]。

$$CN_1 = \frac{CN_2}{2.281 - 0.01281CN_2} \tag{7}$$

$$CN_3 = \frac{CN_2}{0.427 + 0.00573CN_2} \tag{8}$$

表 1 SCS 水文土壤组定义指标

土壤类型	最小下渗率/ (mm·h ⁻¹)	土壤质地
A	7.26	砂土、壤质砂土、砂质壤土
B	3.81~7.26	壤土、粉砂壤土
C	1.27~3.81	砂黏壤土
D	0.00~1.27	黏壤土、粉砂黏壤土、砂黏土、粉砂黏土、黏土

表 2 前期土壤湿润程度等级划分

AMC	前 5 d 降水/mm	
	休眠期	生长期
	< 13	< 36
	13~28	36~53
	> 28	> 53

2 材料和方法

2.1 资料来源

本文基础研究资料是选取陕西省绥德县辛店沟试验小区的降水径流资料,采用了苜蓿、谷子、高粱 3 种在黄土区具有代表性的植物类型进行研究。绥德辛店沟位于东经 110°08',北纬 37°29'处,海拔高度 990~1 016 m,处于黄土高原丘陵沟壑区,年平均降水量 475.9 mm,6—9 月的降水量占年降水量的 72.5%,年平均气温 10.2℃,最高气温 39.1℃,最低气温 -27.1℃。

研究区土壤类型以黄绵土为主,田间持水量 0.212 cm³/cm³,凋萎湿度 0.058 cm³/cm³,最小入渗速率 5.0 mm/h。该研究土类在 SCS—CN 模型中属 B 类土,表 3 列出了试验小区的基本概况。

表 3 辛店沟试验小区基本情况

小区名称	坡度/(°)	土地利用	观测年限	降雨事件
辛店沟 2	28.5	谷子	1954—1958	25
辛店沟 5	28.9	谷子	1954—1958	16
辛店沟 7	34.3	苜蓿	1954—1960	29
辛店沟 9	32.8	苜蓿	1954—1960	31
辛店沟 11	28.7	高粱	1954—1957	21
辛店沟 18	14.7	高粱	1954—1958	31
合计				153

注:小区坡长皆为 20 m,坡宽 5 m;土壤类型皆为黄绵土。

2.2 数据分析

采用 Nash 公式^[11],运用模型拟合效率 E 和线性回归方程的截距、斜率、决定系数 R² 对预测径流深和观测径流深作比较。

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2} \quad (9)$$

式中： Q_i ——观测的第 i 场降雨产生的径流深度 (mm)； \bar{Q}_i ——预测的第 i 场降雨产生的径流深度 (mm)； \bar{Q} ——所有观测径流深度的平均值 (mm)； n ——总径流次数。对于非线性模型，和 CN 的优化用最小平方差 (LSE) 作为最优判定的目标函数^[12]：

$$LSE = \min \sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q}_i)^2 \quad (10)$$

3 结果与分析

3.1 标准 SCS—CN 方法预测径流

根据试验小区土壤和植被类型，查 SCS 手册^[9]得到各小区标准 CN_2 值为：谷子 76，苜蓿 72，高粱 78。然后用方程 (5) 来计算每一次降雨事件的径流量，计算值与实测值的对比结果如图 1 所示。由图 1 可以看出，标准 SCS—CN 法不能准确预测小降雨事件的径流量，降雨中 66.7% 的径流估算值为 0，甚至有些大于 10 mm 的径流事件，预测的径流值也为 0。这是由于当 $P > 0.2S$ 时许多小降雨量的径流值都估算为 0。造成这种结果的主要原因是标准 SCS—CN 法的初损率 采用了 一个标准值 $\lambda = 0.2$ ，然而许多研究表明 在 0 到 0.3 之间变化^[7]。Woodward^[6]研究发现 90% 的 λ 值小于 0.2，可见 λ 是影响小降雨事件径流估算的一个重要因素。由表 4 可以看出标准 SCS—CN 法预测的径流与实测值线性回归关系是：斜率 0.546 5，截距 - 1.433 5，这说明标准 SCS—CN 法预测的径流值小于实测值。模型效率 (E) 仅有 0.294，这进一步说明标准 SCS—CN 法不能准确预测黄土高原地区降水产流事件，必须进行适当修正，特别是需要对 λ 进行优化。

3.2 Woodward 修改 SCS—CN 方法预测径流

针对标准 SCS—CN 方法地区适应性差的问题，Woodward^[6]在美国东部、中西部和南部地区，选择了 307 个试验流域或小区，对 λ 和 CN 进行了优化。在研究中根据实际降雨径流资料计算各次径流的 λ ，优化后的 λ 值为 0.05。并建立了 λ 取值为 0.2 与取值为 0.05 时 CN 值之间的转化关系：

$$CN_{0.05} = \frac{100}{1.879 [(100 / (CN_{0.20} - 1))^{1.15}]} \quad (11)$$

$$Q = \frac{(P - 0.05S)^2}{P + 0.95S} \quad (P > 0.05S) \quad (12a)$$

$$Q = 0 \quad (P \leq 0.05S) \quad (12b)$$

应用 Woodward 方法，取 $\lambda = 0.05$ ，同时 CN 值

按照方程 (11) 进行转化，然后运用公式 (12) 对降雨径流进行估算。预测径流与实测径流的关系见图 2，线性回归分析结果见表 4。结果表明，(1) Woodward 法的 CN 取值比标准的 CN 值小，谷子地的 CN_2 值由 76 减少到 66.7；高粱地的 CN_2 取值由 78 减少到 69.5；苜蓿地的 CN_2 取值由 72 减少到 61.2。(2) Woodward 法相对于标准 SCS—CN 法，模型的预测精度有所提高，模型效率 E 由 0.294 提高到 0.374；预测值与实测值间线性回归决定系数 R^2 由 0.595 1 提高为 0.600 3；截距由 - 1.433 5 变为 - 0.928 2。(3) $P > 0.05S$ 时，小降雨事件的预测径流深值为 0 的百分比由 66.7% 减少到 34.1%，表明 Woodward 改进的 SCS—CN 方法比标准 CN 方法能在一定程度上提高对小降水径流事件的预测精度。但其模型拟合效率仅有 0.374，斜率 (0.544 6) 小于 1.0，这说明 Woodward 改进的 SCS—CN 方法还是不能准确预测黄土高原地区的降水产流关系，需进一步优化 λ 值。

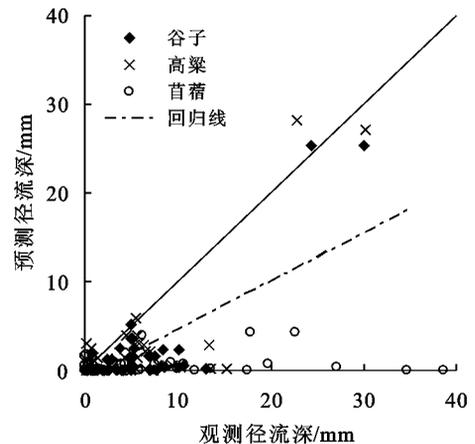


图 1 标准 SCS—CN 方法预测径流与实测径流比较

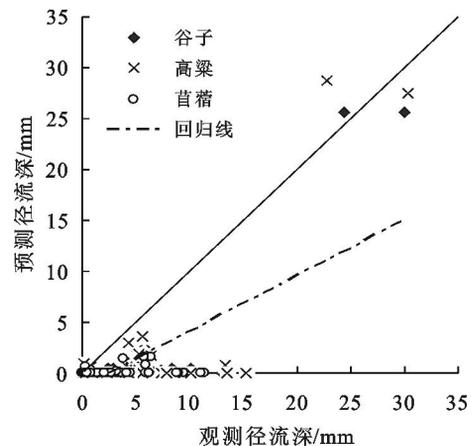


图 2 Woodward 改进的 SCS—CN 方法预测径流与实测径流比较

3.3 初损率 的优化结果与分析

首先取 CN 值为标准 SCS—CN 法的值，然后对 λ 进行优化。 λ 的取值范围为 0~1，步长为 0.01，应

用 LSE 作为最优判定标准,得到 的最优值 = 0.01。径流计算公式变为:

$$Q = \frac{(P - 0.01S)^2}{P + 0.99S} \quad (P > 0.01S) \quad (13a)$$

$$Q = 0 \quad (P \leq 0.01S) \quad (13b)$$

由图 2 与图 3 作比较可以看出, 优化后的模型对小降水径流事件的估算精度比 Woodward 改进的 SCS—CN 方法有所提高。从表 4 可以看出, 优化后的模型效率 E 由 Woodward 法的 0.374 提高为 0.523; 优化后的斜率由 Woodward 法的 0.544 6 提高为 0.674 6,截距由 - 0.928 2 变为 0.764 5。从图 3 可以看出,当实测径流的 = 0.01 时,应用 SCS—CN 模型对研究区进行径流预测时,提高了 SCS—CN 模型对小降水径流事件的预测精度;模型效率 E 由标准 CN 法的 0.294 提高到 0.523(表 4),线性回归分析的截距由标准 SCS—CN 法的 - 1.433 5 变为 0.764 5,斜率由 0.546 5 提高到 0.674 6。这说明在

黄土高原丘陵沟壑区,由于具体气候、植被、土壤、土地利用等因素差异,应用标准 SCS—CN 方法进行径流估算时,对 的取值必须进行地区适应性评价,得到适合具体情况的 值。

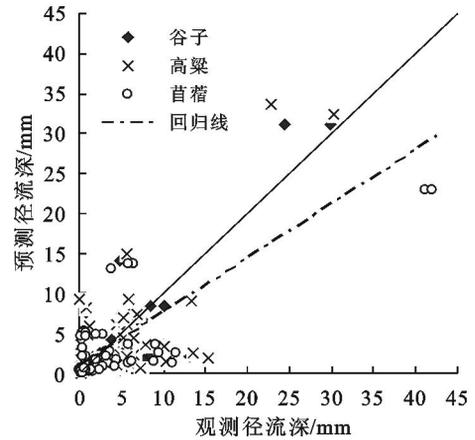


图 3 优化 预测径流与实测径流比较

表 4 径流预测模型分析

方法	作物	CN ₂		线性回归			E
				截距	斜率	R^2	
标准 SCS—CN 方法	谷子	76.0	0.20	- 1.433 5	0.546 5	0.595 1	0.294 0
	高粱	78.0					
	苜蓿	72.0					
Woodward 改进的 CN 方法	谷子	66.7	0.05	- 0.928 2	0.544 6	0.600 3	0.374 0
	高粱	69.5					
	苜蓿	61.2					
标准 CN ₂ 不变,优化	谷子	76.0	0.01	0.764 5	0.674 6	0.560 4	0.523 0
	高粱	78.0					
	苜蓿	72.0					
优化 ,CN ₂	谷子	74.0	0.01	0.570 5	0.645 4	0.577 6	0.541 0
	高粱	72.0					
	苜蓿	74.0					

3.4 CN₂ 的优化结果与分析

在上述 的优化值等于 0.01 的基础上,我们对 3 种土地利用类型 CN₂ 值也进行了优化,希望进一步提高模型预测精度。选取 CN₂ 值的取值范围为 55 ~ 95^[7],步长为 1 进行模型演算,运用方程(13)计算得到预测径流量,用 LSE 作为最优判定标准,当 LSE 最小时,分别得到谷子、苜蓿和高粱地的 CN₂ 优化值。优化结果是谷子、苜蓿、高粱地的 CN₂ 值由 76, 72, 78 分别优化为 74, 74, 72。由表 4 可以看出, (1) 拟合曲线的决定系数比标准 CN 法有所提高,但比 Woodward 改进的 SCS—CN 方法有所降低。(2) 拟合曲线的斜率比标准 CN 法和 Woodward 改进的

SCS—CN 方法都有所增加。(3) 拟合曲线的截距更接近于 0,优化 ,CN 方法的截距(| 0.570 5|) < 优化 方法的截距(| 0.764 5|) < Woodward 改进的 SCS—CN 方法的截距(| - 0.928 2|) < 标准 SCS—CN 方法(| - 1.4335|);(4) 模型模拟效率 E 有所提高:优化 ,CN 方法(0.541) > 优化 方法(0.523) > Woodward 改进的 SCS—CN 方法(0.374) > 标准 SCS—CN 法(0.294)。因此, ,CN 优化后模型提高了对所有降水产流事件的预测精度。由图 4 与图 1—3 对比也可以很清楚的表明,通过优化 SCS—CN 模型能提高对黄土高原地区降水产流量的预测精度,特别是对小降水产流事件。但是还要看到,即使通过

优化 CN_2 的值,SCS—CN 方法对本次研究的 153 场降水产流事件预测结果仍不很理想,模型拟合精度也只有 0.541,预测值与实测值之间的决定系数只有 0.578,斜率只有 0.645。这说明模型对大降水产流事件的径流值预测偏低。分析其原因,我们认为标准 SCS—CN 方法对前期土壤湿润程度等级划分标准不适合黄土高原地区,相关研究报道也证明了这一点^[13];另外,标准 SCS—CN 方法没有考虑降水强度对 CN 的影响,这在一定程度上也将影响模型预测精度。因此,探讨适合黄土高原地区的前期土壤湿度等级划分标准,将降水强度引入 SCS—CN 模型是提高模型预测精度有效方法。

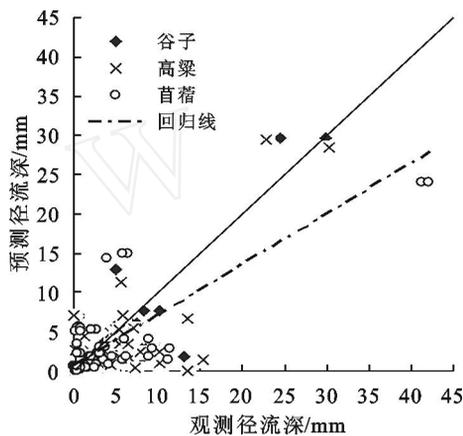


图 4 优化 CN_2 后预测径流与实测径流比较

4 结论

(1) 标准 SCS—CN 法直接应用于黄土高原地区时,对于大部分小降水事件的径流值预测偏低,模型拟合效率为 0.294;Woodward 改进的 SCS—CN 方法对径流的预测的准确性虽然有所提高,但模型拟合效率也只有 0.374。

(2) 经本研究优化后,对于所研究的降水事件,在 $\alpha = 0.01$,谷子、苜蓿、高粱地的 CN_2 值分别是 74, 74, 72 时,模型的预测精度有所提高,模型效率 E 为 0.541,比标准 SCS—CN 法的模型效率提高了 84%,特别是提高了小降水产流事件的预测精度。

总体来说,优化后的 CN_2 值,特别是对小降水产流事件比传统的 SCS—CN 方法中的提供值更适合于黄土高原地区降水产流预测。但是由于 SCS—CN 模型是在美国缓坡地上发展起来的,在黄土高原应用需要做坡度修正^[13];另外,SCS—CN 模型对前期土壤湿度等级划分缺乏理论基础^[14],没有考虑降水强度对径流的影响,这在一定程度上限制了模型预报精度。因此,在黄土高原地区应用 SCS—CN 模型预测降水产流尚需做大量的工作。

[参 考 文 献]

- [1] 王占礼,邵明安,常庆瑞.黄土高原降雨因素对土壤侵蚀的影响[J].西北农业大学学报,1998,26(4):101—105.
- [2] U. S. Department of Agriculture. Soil Conservation Service. Hydrology [M]. In 'SCS National Engineering Handbook', Section 4. U. S. Gov. Print. Office: Washington, D. C., 1972.
- [3] Rallison R E, Cronshey R G. Discussion of "runoff curve numbers with varying site moisture" [J]. Journal of the Irrigational Drainage Division, ASCE, 1979, 105: 439—441.
- [4] Sobhani G. A review of possible watershed design methods for possible adoption to Iranian conditions [D]. Utah:Utah State Univ., 1976.
- [5] 罗利芳,张科利,符素华.径流曲线数法在黄土高原地表径流量计算中的应用[J].水土保持通报,2002,22(3):58—61.
- [6] Donald E, Woodward, Richard H, Jiang, et al. Runoff curve number method: examination of the initial abstraction [R]. TRB 2004 Annual Meeting CD - ROM, 2004.
- [7] Ponce V M, Hawkins R H. Runoff curve number: Has it reached maturity [J]. Hydrologic Engineering, ASCE, 1996, 1(1):11—19.
- [8] Boughton W C. A review of the USDA SCS curve number method [J]. Australian: Journal of Soil Research, 1989, 27: 511—523.
- [9] USDA—SCS. Urban hydrology for small watersheds. Technological Release No. 55 (TR - 55) [S]. Washington, D. C., 1986.
- [10] Mockus V. Estimation of total (and peak rates of) surface runoff for individual storms [M]. U. S. Department of Agriculture, Washington, D. C., 1949.
- [11] Nash J E, Sutcliffe J E. Modeling infiltration during steady rain [J]. Water Resources Research 1970, 9: 384—394.
- [12] McCuen R H, Synder W M. In Hydrologic Modeling: Statistical Methods and Applications [M]. Prentice-Hall: Englewood Cliffs, N.J. 1986.
- [13] Mingbin Huang, Jacques Gallichand, Cuiyun Dong, et al. A modification to the Soil Conservation Service curve number method for steep slopes in the Loess Plateau of China [J]. Hydrological Processes, 2006, 20: 579—589.
- [14] Mingbin Huang, Jacques Gallichand, Cuiyun Dong, et al. Use of soil moisture data and curve number method for estimating runoff in the Loess Plateau of China [J]. Hydrological Processes, 2007, 21: 1471—1481.