

永定河下游河道生态需水量研究

严军 郎心学 柴洪敏 孙东坡

(华北水利水电学院, 河南郑州 450008)

摘要 多沙河流生态需水量中最为重要的是输沙需水量, 本文通过分析河道输沙的实际过程, 提出了输沙需水量概念和计算方法, 并计算、分析了永定河下游河道的输沙需水量, 提出了输沙用水调控原则, 为多沙河流输沙需水量的计算和输沙用水调控提供了有益的借鉴。

关键词 生态需水量; 输沙流量; 单位输沙需水量; 输沙用水调控

1 研究意义

生态需水量是特定区域内生态系统需水量的总称, 包括为保护和恢复植被及生态环境的用水、水土保持用水、维持河流水沙平衡的基流、地下水回补水量等方面, 其中最为重要的是维持河流功能的水量, 对北方多沙河流而言即输沙需水量, 这也是从中国河流特殊的生态系统考虑而提出的概念。鉴于中国普遍存在河道径流减少、断流现象增多和洪水威胁加剧的趋势, 维持河道水沙平衡的重要性显得日益突出。河流输沙功能的衰竭将导致河道淤积的加剧和河流系统功能的丧失, 为保障河流输沙功能的基本要求, 必须充分利用有限且相对不足的水资源。因此, 河道输沙需水量研究具有重要的理论与现实意义。

2 输沙需水量的研究现状

2.1 输沙需水量概念

天然河流中, 一定条件下的水流能够挟带一定量的泥沙, 反过来看, 输送一定量的泥沙需要一定的水量, 当实际水量小于此水量时, 部分泥沙将淤积于河道内, 此时, 全部水量用于输沙; 当实际水量大于此水量时, 河道可能冲刷而达到新的水沙平衡, 这种情况下, 全部水量中只有一部分用于泥沙输移。因此, 输沙需水量可以定义为: 在一定水沙条件和河床边界条件下, 将一定量泥沙输移至下一河段所需要的水量。单位输沙水量可以定义为: 在一定水沙条件及河床边界条件下, 将单位重量泥沙输移至下一河段所需的水量。高效输沙水量则是指在一定水沙条件和河床边界条件下, 将一定量的泥沙输移至下一河段所需要的最小水量, 且此时输沙效率与河道淤积情况综合最优。

以往对输沙需水量的研究中, 特定输沙情况下的净水量(径流量除去泥沙体积所剩的净水体积)往往被称为输沙需水量^{[1][5]}, 但是实际情况下, 净水量并不总是全部用来输沙

的，只有在平衡状态或淤积情况下，净水量才全部用于输沙。输沙需水量特指净水量中用于泥沙输移的水量，视水沙条件和输沙效率的不同，输沙需水量是净水量的部分或全部^[6]。

2.2 输沙需水量计算方法

冲淤平衡临界状态时，河道不冲不淤或者冲刷量与淤积量相等。对天然河道而言，河道淤积比为零时显然不冲不淤，即河道处于冲淤平衡状态，但是对于多沙河流而言，其下游河道淤积比往往大于1，河道常处于淤积状态，而且冲淤平衡状态是一个范围，难以精确把握，因此，可以适当放宽对淤积性河道冲淤平衡状态的要求，如认为淤积比为10%或20%时河道近似处于冲淤平衡状态（即 $\eta'_{\text{临界}}=0.1$ 或0.2），此时，输移一定量泥沙所需的输沙水量就是冲淤平衡临界状态时的输沙水量（即高效输沙水量），当淤积比大于10%或20%时，认为河道处于淤积状态。

实际水量、输沙需水量和高效输沙水量之间的关系如图1所示，图中直线 $a-a'$ 、 $b-b'$ 和 $c-c'$ 对应的淤积比分别为10%、20%和100%。由图可见：①河段淤积比随实际水量的增大而减小，也随输沙需水量的增大而减小；②同一淤积比下，输沙需水量小于实际水量，而且其差值随实际水量的增大而增大、随淤积比的增大而减小；③多沙河流一般淤积较为严重，视河道淤积程度及用水要求的不同，河道冲淤平衡的标准可定为淤积比为0、10%或20%，实际水量与Y轴、 $a-a'$ 和 $b-b'$ 的交点即为这三种冲淤平衡情况下的临界水量，输沙需水量与Y轴、 $a-a'$ 和 $b-b'$ 的交点即为这三种冲淤平衡情况下的高效输沙水量；④对于河段淤积比为100%的极端情况，上游来沙全部淤积于下游河道，实际水量全部用于输沙，输沙需水量在数值上与实际水量相等。

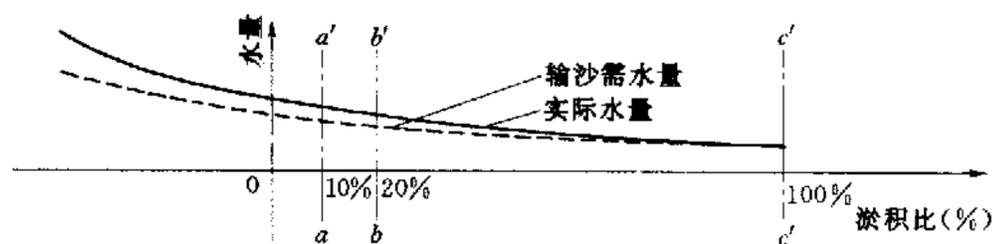


图1 实际水量、输沙水量和高效输沙水量之间的关系

输沙需水量可以由下式计算^[6]：

$$W' = \eta^a \cdot W_w \quad (1)$$

$$W_w = W - W_s/\gamma_s \quad (2)$$

式中： W' 为输沙需水量， m^3 ； η 为输沙效率； a 为系数（其值由输沙效率 η 确定^[6]）； W_w 为净水量， m^3 ； W 为径流量， m^3 ； W_s 为输沙量，亿t； γ_s 为泥沙容重（通常取 $2.65t/m^3$ ）。

通过考察河段进口站和出口站的输沙量或含沙量可以确定其冲淤情况，进而确定输沙效率 η 及系数 a 。

$$q' = W'/W_s \quad (3)$$

式中： q' 为单位输沙需水量， m^3/t ； W' 为输沙需水量， m^3 ； W_s 为输沙量，t。

3 永定河下游河道输沙需水量研究

永定河是海河水系中最大的一条河流,下游河道因泥沙淤积,已形成地上河且迁徙不定,近年来随流域内人口与工农业的发展,流域内缺水问题更为严重,本文以永定河为例研究河道输沙需水量的具体特性。

3.1 河道概况

永定河上游流经黄土高原,河水含沙量大,因此有“小黄河”、“浑河”之称,下游河道因迁徙不定,旧称“无定河”。永定河多年平均年径流量 20.29 亿 m^3 ,最大为 36.30 亿 m^3 (1956 年),最小为 11.19 亿 m^3 (1972 年),最大与最小年径流量的比值为 3.24,是海河水系中山区年径流年际变化最小的河系。选择永定河响水堡、石匣里、官厅、雁翅、三家店和卢沟桥 6 个主要水文站,利用这 6 个水文站的资料进行计算和分析。

3.2 永定河下游河道水沙特性

根据 1948~1989 年永定河下游河道 6 个主要水文站的逐日水沙资料(流量、含沙量等),计算各站每日的径流量和输沙量,将每年分为汛期(7~10 月)、非汛期(1~6 月和 11~12 月)和全年(1~12 月),计算各水文站汛期、非汛期和全年的径流量、输沙量、平均流量和平均含沙量并分析其变化规律。具体处理时,考虑官厅水库的影响,将响水堡与石匣里站径流量或输沙量作为一个变量考虑。

对各水文站实测资料的分析表明,各水文站的径流量、平均流量从 1956 年起明显地呈现逐年递减的趋势。以官厅水库为例,1956 年以前官厅汛期径流量多大于 8.84 亿 m^3 ,1956 年以后官厅水库出库径流量多小于 5 亿 m^3 (特别是 1980 年以后多小于 2.4 亿 m^3);非汛期出库径流量自 1962 年以后多小于 8 亿 m^3 ,1980 年以后多小于 4 亿 m^3 ;1970 年以后全年出库径流量多小于 10 亿 m^3 ,1980 年以后多小于 6 亿 m^3 。1956 年以前官厅汛期流量多大于 82 m^3/s ,1956 年以后多小于 50 m^3/s (特别是 1980 年以后多小于 22 m^3/s);非汛期出库流量自 1962 年以后多小于 43 m^3/s ,1980 年以后多小于 20 m^3/s ;1970 年以后全年出库流量多小于 40 m^3/s ,1980 年以后多小于 20 m^3/s 。

各站汛期输沙量和平均含沙量都明显大于非汛期,汛期是输沙的主要时期。仍以官厅水库为例,1956 年以前,官厅站汛期平均含沙量一般大于 43 kg/m^3 ,非汛期平均含沙量一般大于 10 kg/m^3 ,年平均含沙量一般大于 20 kg/m^3 。1956 年以后,上游来沙大部分淤积于库区,官厅站各时期平均含沙量均大幅度减小,汛期入库平均含沙量多为 10~25 kg/m^3 、出库含沙量一般小于 2 kg/m^3 ,非汛期入库平均含沙量多为 2~7 kg/m^3 、出库含沙量均小于 0.039 kg/m^3 ,年平均入库含沙量多为 5~15 kg/m^3 、出库含沙量均小于 3 kg/m^3 。尽管出库沙量大幅度减小,但由于下游地区过度用水使下游各站水量沿程衰减甚至断流,也可能造成下游河道淤积,使得下游河道输沙条件进一步恶化。

自然条件变化及人类活动影响导致永定河下游各水文站径流量出现这种变化,且从根本上影响下游河道的输沙规律。官厅水库的修建,使永定河下游河道的水沙特性发生了非常明显的变化,为此,将 1948~1989 年分为 1948~1956 年和 1957~1989 年两个时段,分析永定河下游河道的水沙特性。表 1 为 1948~1956 年、1957~1989 年和 1948~1989 年官厅汛期、非汛期和全年进、出库径流量、沙量、平均流量和平均含沙量。

表 1

官厅不同时期进、出库水沙要素统计表

时 期	1948~1989 年				1948~1956 年				1957~1989 年				
	W (亿 m ³)	W _s (10 ⁶ t)	Q (m ³ /s)	S (kg/m ³)	W (亿 m ³)	W _s (10 ⁶ t)	Q (m ³ /s)	S (kg/m ³)	W (亿 m ³)	W _s (10 ⁶ t)	Q (m ³ /s)	S (kg/m ³)	
入 库	汛期	5.07	17.65	47.68	34.84	7.12	43.16	67.03	60.59	4.57	11.47	42.99	25.10
	非汛期	5.46	4.02	26.13	7.36	6.77	8.76	32.40	12.92	5.15	2.88	24.61	5.59
	全年	10.53	21.68	33.39	20.58	13.90	51.92	44.07	37.36	9.71	14.34	30.81	14.76
出 库	汛期	4.57	10.65	43.00	23.30	9.03	45.06	84.99	49.89	3.59	0.61	33.81	1.70
	非汛期	6.78	1.67	32.43	2.47	8.16	7.39	39.01	9.06	6.48	0.01	30.99	0.01
	全年	11.35	12.32	35.99	10.86	17.19	52.45	54.51	30.51	10.07	0.62	31.94	0.61

由表 1 可知, 与 1948~1956 年相比, 1957~1989 年官厅汛期、非汛期和全年入库和出库流量均有所减小。水流条件的减弱使得对应时期入库含沙量大幅度减小, 且减小的幅度超过 50%, 出库流量过程的“坦化”也降低了大流量过程的水流强度, 对下游河道输沙极为不利。水流条件的减弱不仅使 1957~1989 年官厅入库含沙量较 1948~1956 年大幅度减小, 而且使 1957~1989 年官厅出库含沙量减小的幅度更大 (同一时期出库含沙量不足入库含沙量的 7%)。

3.3 永定河下游河道冲淤特性

1948~1989 年官厅—卢沟桥河段汛期、非汛期和全年的淤积比均随官厅水库对应时期出库平均流量的增大而减小, 其非汛期点群较为分散、全年次之, 汛期点群较为集中。官厅—卢沟桥河段汛期、非汛期和全年的淤积比与官厅对应时期出库平均流量之间的关系可分别用下式表达:

$$\Delta W_s/W_s = -61.587 \ln Q + 248.14 \quad (4)$$

$$\Delta W_s/W_s = -178.82 \ln Q + 602.62 \quad (5)$$

$$\Delta W_s/W_s = -68.273 \ln Q + 253.79 \quad (6)$$

式中: $\Delta W_s/W_s$ 为官厅—卢沟桥河段淤积比, %; Q 为官厅出库平均流量, m³/s。

根据式 (4) ~ 式 (6), 可计算官厅—卢沟桥河段汛期、非汛期和全年冲淤平衡 (淤积比为 0、10% 或 20%) 时官厅水库对应时期的出库流量 (官厅临界出库流量), 计算结果如表 2 所示。

表 2

官厅—卢沟桥河段冲淤平衡时官厅临界出库流量

时 期	官厅水库多年平均出库水沙情况				官厅临界出库流量 (m ³ /s)		
	W (10 ⁶ m ³)	W _s (10 ⁶ t)	Q (m ³ /s)	S (kg/m ³)	淤积比为 0	淤积比为 10%	淤积比为 20%
汛 期	456.93	10.65	43.00	23.30	56.21	47.79	40.62
非汛期	677.98	1.67	32.43	2.47	29.08	27.50	26.00
全 年	1134.91	12.32	35.99	10.86	41.15	35.55	30.70

由表 2 可见, 官厅—卢沟桥河段淤积比为 0、10% 或 20% 时, 官厅水库汛期临界出库

流量分别为 $56.21\text{m}^3/\text{s}$ 、 $47.79\text{m}^3/\text{s}$ 和 $40.62\text{m}^3/\text{s}$ ，非汛期临界出库流量分别为 $29.08\text{m}^3/\text{s}$ 、 $27.50\text{m}^3/\text{s}$ 和 $26.00\text{m}^3/\text{s}$ ，全年临界出库流量分别为 $41.15\text{m}^3/\text{s}$ 、 $35.55\text{m}^3/\text{s}$ 和 $30.70\text{m}^3/\text{s}$ 。因非汛期出库沙量远小于汛期，官厅非汛期临界出库流量也远小于汛期。汛期、非汛期和全年的临界出库流量均随官厅一卢沟桥河段淤积比的增大而减小。

官厅一卢沟桥河段淤积比为 0 时，官厅水库汛期和全年临界出库流量均大于对应时期多年平均出库流量、非汛期临界出库流量小于多年平均出库流量；官厅一卢沟桥河段淤积比为 10% 时，官厅水库汛期出库流量大于汛期多年平均出库流量、非汛期和全年临界出库流量小于对应时期多年平均出库流量；官厅一卢沟桥河段淤积比为 20% 时，官厅水库汛期、非汛期和全年出库流量均小于对应时期多年平均出库流量。

3.4 永定河下游河道输沙需水量特性

3.4.1 输沙需水量分析

与输沙需水量的定义类似，流量中用于输沙的那部分称为输沙流量。1948~1989 年官厅一卢沟桥河段汛期、非汛期和全年的淤积比均随官厅水库对应时期出库输沙流量的增大而减小，其非汛期点群较为分散、全年次之，汛期点群较为集中。

官厅一卢沟桥河段汛期、非汛期和全年的淤积比与官厅对应时期出库输沙流量之间的关系可分别用下式表达：

$$\Delta W_s/W_s = -19.862\ln Q' + 34.409 \quad (7)$$

$$\Delta W_s/W_s = -167.06\ln Q' + 484.37 \quad (8)$$

$$\Delta W_s/W_s = -21.295\ln Q' + 70.501 \quad (9)$$

式中： $\Delta W_s/W_s$ 为官厅一卢沟桥河段淤积比，%； Q' 为官厅出库输沙流量， m^3/s 。

根据式 (7) ~ 式 (9)，可计算官厅一卢沟桥河段汛期、非汛期和全年冲淤平衡（淤积比为 0、10% 或 20%）时官厅水库对应时期的出库输沙流量（即官厅临界输沙流量），计算结果如表 3 所示。

表 3 官厅一卢沟桥河段冲淤平衡时官厅临界出库输沙流量

时 期	官厅水库多年平均出库水沙情况				官厅临界出库输沙流量 (m^3/s)		
	W (10^6m^3)	W_s (10^6t)	Q (m^3/s)	S (kg/m^3)	淤积比为 0	淤积比为 10%	淤积比为 20%
汛 期	456.93	10.65	43.00	23.30	34.41	20.80	12.57
非汛期	677.98	1.67	32.43	2.47	18.16	17.11	16.11
全 年	1134.91	12.32	35.99	10.86	27.40	17.13	10.71

由表 3 可见：

1) 官厅一卢沟桥河段淤积比为 0、10% 或 20% 时，官厅水库汛期临界出库输沙流量分别为 $34.31\text{m}^3/\text{s}$ 、 $20.80\text{m}^3/\text{s}$ 和 $12.57\text{m}^3/\text{s}$ ，非汛期临界出库输沙流量分别为 $18.16\text{m}^3/\text{s}$ 、 $17.11\text{m}^3/\text{s}$ 和 $16.11\text{m}^3/\text{s}$ ，全年临界出库输沙流量分别为 $27.40\text{m}^3/\text{s}$ 、 $17.13\text{m}^3/\text{s}$ 和 $10.71\text{m}^3/\text{s}$ 。汛期、非汛期和全年的临界出库输沙流量均随官厅一卢沟桥河段淤积比的增大而减小。

2) 官厅一卢沟桥河段淤积比为 0、10% 或 20% 时，官厅水库汛期临界出库输沙流量

均小于相同条件下多年平均出库流量，也小于相同条件下出库临界流量。这表明实际流量确实并非全部用于泥沙输移。

比较相同条件下（同一时期、同一淤积比）官厅出库临界流量和临界输沙流量，发现：

1) 相同条件下官厅出库临界流量均小于出库临界流量，这表明即使在冲淤平衡条件下，临界流量也并非全部用于泥沙输移。

2) 官厅—卢沟桥河段淤积比与官厅出库流量的关系较为分散，与此相比，官厅—卢沟桥河段淤积比与官厅出库输沙流量相关关系大为增强，这一方面表明实际流量并非全部用于泥沙输移，另一方面表明输沙流量比实际流量更能揭示泥沙输移的实质。

3.4.2 单位输沙需水量分析

根据输沙需水量与单位输沙需水量的关系，由式(3)计算1948~1989年官厅（出库）、雁翅、三家店和卢沟桥汛期、非汛期和全年的单位输沙需水量，可以发现，1948~1989年官厅—卢沟桥河段汛期、非汛期和全年的淤积比均随官厅水库对应时期单位输沙需水量的增大而减小，其非汛期点群较为分散、全年次之，汛期点群较为集中。

官厅—卢沟桥河段汛期、非汛期和全年的淤积比与官厅对应时期单位输沙需水量之间的关系可分别用下式表达：

$$\Delta W_s/W_s = -1.2831q' + 64.731 \quad (10)$$

$$\Delta W_s/W_s = -55.592 \ln q' + 230.78 \quad (11)$$

$$\Delta W_s/W_s = -0.9068q' + 52.281 \quad (12)$$

式中： $\Delta W_s/W_s$ 为官厅—卢沟桥河段淤积比，%； q' 为官厅单位输沙需水量， m^3/t 。

根据式(10)~式(12)，可计算官厅—卢沟桥河段汛期、非汛期和全年冲淤平衡（淤积比为0、10%或20%）时官厅对应时期的单位输沙需水量（即官厅临界单位输沙流量），计算结果如表4所示。

表4 官厅—卢沟桥河段冲淤平衡时官厅临界单位输沙需水量

时 期	官厅水库多年平均出库水沙情况				官厅临界单位输沙需水量 (m^3/t)		
	W ($10^6 m^3$)	W_s ($10^6 t$)	Q (m^3/s)	S (kg/m^3)	淤积比为0	淤积比为10%	淤积比为20%
汛 期	456.93	10.65	43.00	23.30	50.43	42.64	34.85
非汛期	677.98	1.67	32.43	2.47	63.52	53.06	44.33
全 年	1134.91	12.32	35.99	10.86	57.65	46.63	35.60

由表4可见：

1) 官厅—卢沟桥河段淤积比为0、10%或20%时，官厅汛期临界单位输沙需水量分别为 $50.43m^3/t$ 、 $63.52m^3/t$ 和 $57.65m^3/t$ ，非汛期临界单位输沙需水量分别为 $42.64m^3/t$ 、 $53.06m^3/t$ 和 $46.63m^3/t$ ，全年临界单位输沙需水量分别为 $34.85m^3/t$ 、 $44.33m^3/t$ 和 $35.60m^3/t$ 。汛期、非汛期和全年的临界单位输沙需水量均随官厅—卢沟桥河段淤积比的增大而减小。

2) 官厅—卢沟桥河段淤积比为0、10%或20%时，同一淤积比时官厅临界单位输沙

需水量均非汛期最大、全年次之、汛期最小。这表明输沙效率以汛期最高、全年次之、非汛期最低。

根据输沙需水量、输沙流量和单位输沙需水量的定义,输沙流量与单位输沙需水量之间的关系可用下式表达:

$$Q' = W'/t = \frac{W_s \cdot q'}{t} \quad (13)$$

式中: Q' 为输沙流量, m^3/s ; W' 为输沙需水量, m^3 ; t 为时间, s ; W_s 为输沙量, t , q' 为单位输沙需水量, m^3/t 。

由式(13)可知:输沙量一定的情况下,输沙流量与单位输沙需水量成正比;单位输沙需水量一定时,输沙流量与输沙量成正比;输沙流量一定的情况下,输沙量与单位输沙需水量成反比。

4 输沙用水调控原则

根据对永定河下游河道输沙需水量和单位输沙需水量的计算和分析,可采用以下输沙用水调控原则。

4.1 优先选用临界单位输沙需水量

在输沙量一定的情况下,输沙流量与单位输沙需水量成正比,而同一输沙量下,较大的单位输沙需水量往往意味着较低的输沙效率,因此,欲达到较高的输沙效率必须选择较小的单位输沙需水量,但单位输沙需水量较小时,输沙需水量也较小。由淤积比与输沙需水量的关系可知,输沙需水量越小,河道越易于淤积、淤积比越大。所以,在输沙量一定的情况下,欲达到较高的输沙效率并使河道淤积比较小,可以选择河道处于冲淤平衡时的临界单位输沙需水量。因具体河道的输沙效率一般以汛期最高、全年次之、非汛期最低,故可选择汛期冲淤平衡时的临界单位输沙需水量。

4.2 辅助措施

在高效输沙的具体过程中,还应注意以下几点:

- 1) 避免流量过程的“坦化”,应在水流强度较大的情况下集中输沙。
- 2) 即使是按冲淤平衡的水沙条件调控官厅出库水沙组合,也应保证下游河道维持相对稳定的流量,避免因流量沿程衰减导致河道淤积。
- 3) 使流量过程维持足够的时间,确保下游河道输沙顺畅。

5 结论

北方多沙河流生态需水量中最重要的输沙需水量,是指在一定水沙条件和河床边界条件下将一定量泥沙输移至下一河段所需要的水量。官厅—卢沟桥河段淤积比为0、10%或20%时,官厅水库汛期临界出库输沙流量分别为 $34.31\text{m}^3/\text{s}$ 、 $20.80\text{m}^3/\text{s}$ 和 $12.57\text{m}^3/\text{s}$,汛期、非汛期和全年的临界出库输沙流量均随官厅—卢沟桥河段淤积比的增大而减小。可优先选用临界单位输沙需水量并采用适当的辅助措施对水沙需水量进行调控。

参考文献

- 1 钱慧颖,叶青超,曾庆华.黄河干流水沙变化与河床演变(1991~1995年).北京:中国建材工业出

版社, 1993

- 2 岳德军, 侯素珍等. 黄河下游输沙需水量研究. 人民黄河, 1996 (40): 32-33
- 3 赵华侠, 陈建国等. 黄河下游洪水期输沙用水量与河道泥沙冲淤分析. 泥沙研究, 1997 (3): 57-61
- 4 费祥俊. 高含沙水流长距离输沙机理与应用. 泥沙研究, 1998 (3): 55-61
- 5 石伟, 王光谦. 黄河下游输沙需水量研究评述, 黄河流域水资源演化规律与可再生性维持机理研究与进展. 郑州: 黄河水利出版社, 2001: 199-204
- 6 严军, 胡春宏. 黄河下游河道输沙需水量的计算方法及应用研究. 泥沙研究, 2004 (4)

作者简介: 严军, 男, 1971年2月出生, 2003年11月毕业于中国水利水电科学研究院, 博士; 华北水利水电学院副教授、水利试验中心副主任。地址: 河南省郑州市郑花路20号, 邮编: 450011; 电话: (0371) 65790041; 电子信箱: yanjun@ncwu.edu.cn。